HARALD FRITZSCH

# Yanılıyorsunuz Einstein!




NEWTON, EINSTEIN, HEISENBERG VE FEYNMAN KUANTUM FİZİĞİNİ TARTIŞIYOR

metis bilim | 18

HARALD FRITZSCH

# Yanılıyorsunuz Einstein!

1943'te Almanya'nın Zwickau kentinde dünyaya gelen Harald Fritzsch yükseköğrenimini Leipzig Üniversitesi'nde tamamladı. 1968 yılında üniversite kilisesinin yıkılmasına karşı çıkan bir protesto etkinliğine katıldı ve bunun sonucunda Demokratik Almanya'dan kaçtı (konuyla ilgili olarak yazdığı *Flucht aus Leipzig*, 1990 yılında Piper Yayınevi'nden çıktı).

1968-71 yılları arasında Münih'teki Max Planck Fizik Enstitüsü'nde doktora yaptı ve aynı enstitüde Werner Heisenberg'le beraber çalışma fırsatı buldu. Münih Teknik Üniversitesi'nden doktorasını aldıktan sonra gittiği ABD'de, 1972-76 yılları arasında California Teknoloji Enstitüsü'nde öğretim görevlisi olarak çalıştı. Bu dönemde Richard P. Feynman ve özellikle Murray Gell-Mann ile yakın işbirliği içindeydi. 1976-79 yılları arasında Cenevre'deki CERN'de bilimadamı olarak görev yaptı. Fritzsch gerek CERN gerekse Münih'teki Max Planck Enstitüsü'nde halen konuk bilimadamı olarak hizmet vermekte.

1977'de Wuppertal Üniversitesi'nde fizik profesörü oldu. Ertesi sene kuramsal fizik profesörü olarak Bern Üniversitesi'nde geçti. 1980 yılından bu yana Münih Üniversitesi'nde kuramsal fizik profesörü.

Harald Fritzsch modern fiziğin yaygınlaşması için yıllarca etkin olarak çalıştı, televizyon programları hazırladı, gazete ve dergilerde çok sayıda makalesi yayımlandı. Popüler bilim alanındaki kitaplarından bazıları şunlardır: *Quarks, Urstoff unserer Welt* (1981), *Vom Urknall zum Zerfall* (1983), *Eine Formel verändert die Welt* (1988), *Die verbogene Raum-Zeit* (1996) ve *Das absolut Unveränderliche* (2005).

Fritzsch'in aldığı çok sayıdaki ödül arasında 1989'daki Volkswagen Vakfı Araştırma Ödülü, 1994'teki Alman Fizik Derneği'nin Bilimsel Yayın Madalyası ve 2008 tarihli Dirac Madalyası bulunmakta.



Metis Yayınları
İpek Sokak 5, 34433 Beyoğlu, İstanbul
Tel: 212 2454696 Faks: 212 2454519
e-posta: info@metiskitap.com
www.metiskitap.com
Yayınevi Sertifika No: 10726

Yanılıyorsunuz Einstein!
Newton, Einstein, Heisenberg
ve Feynman Kuantum Fiziğini
Tartışıyor
Harald Fritzsch

Almanca Orijinal Basımı:
Sie irren, Einstein!
Newton, Einstein, Heisenberg
und Feynman diskutieren
die Quantenphysik
Piper, 2008

© Piper Verlag GmbH, Münih, 2008

© Metis Yayınları, 2010
Çeviri Eser © Ogün Duman, 2011

Birinci Basım: Nisan 2012

Yayıma Hazırlayan: Özde Duygu Gürkan
Kapak Fotoğrafı: 1927 Solvay Konferansında
fizikçilerin hatıra fotoğrafı
Kapak Tasarımı: Emine Bora

Dizgi ve Baskı Öncesi Hazırlık: Metis Yayıncılık Ltd.
Baskı ve Cilt: Yaylacık Matbaacılık Ltd.
Fatih Sanayi Sitesi No. 12/197-203
Topkapı, İstanbul Tel: 212 5678003
Matbaa Sertifika No: 11931

ISBN-13: 978-975-342-855-2

HARALD FRITZSCH

# Yanılıyorsunuz Einstein!

## NEWTON, EINSTEIN, HEISENBERG VE FEYNMAN KUANTUM FİZİĞİNİ TARTIŞIYOR

Çeviren: Ogün Duman



metis

# İçindekiler

# Önsöz

Kuantum fiziği kuarkların, atom çekirdeklerinin, atom ve moleküllerin bilimidir ve bize lazeri, transistörü, tünel mikroskobunu, cep telefonunu ve mikroelektroniği kazandırmıştır. Tüm dünyadaki gayrisafi hasılanın üçten birinden büyük kısmı, kuantum fiziğinin getirilerine dayanır. Evrenbilimciler evrenin oluşumunu araştırmak, astrofizikçiler yıldızların dinamiğini tarif etmek için ondan faydalanır. Temel parçacık fiziğinin kaidesini teşkil eden kuantum fiziği, evreni bir arada tutan temel kuvvetleri araştırır.

1963 yılında Leipzig Üniversitesi'nde fizik eğitimi almaya başladım. Üçüncü sömestre geldiğimde hocamızın, Lew D. Landau ve Yevgeni M. Lifschitz'in harikulade ders kitabına dayanarak klasik mekanik konusunda hazırladığı sunumu dinledim. Klasik mekanik sayesinde, ilkesel olarak da olsa her şeyi başarıyla hesaplayıp öngörmek mümkündü. Klasik mekaniğin denklemleri oldukça basittir ve fiziksel bir sistemin geleceğini kati olarak belirleyebilir. Adı geçen denklemler, en küçük etkiyi veren Hamilton ilkesiyle elde edilebilir. İlke, bir sistemin zaman içindeki değişiminin, mümkün olan tüm gelişmeleri gözlemlemek ve bunları birer etkiyle tanımlamakla tespit edilebileceğini öne sürer. Doğadaki gelişmeler genellikle en küçük etkilerle tezahür eder.

Hemen ertesi yıl ilk kuantum mekaniği dersimi aldığımda yaşadığım şaşkınlığı tahmin etmek zor değil. Zira burada olayların aslında o kadar da net olmadığını öğrendim. Ansızın kati durumlar değil, sadece olasılıklar söz konusuydu. Olasılıkları kesin biçimde hesaplamak mümkün olsa da, belli bir olayın ortaya çıkma belirsizliği halen geçerliydi – pek tatmin edici bir durum olmadığı aşikâr. En küçük etki ilkesi kuantum fiziğinde geçerli değildi. Fiziğin bu biçimiyle sorunlar yaşadım.

Birkaç yıl sonra ABD Pasadena'da, kısa adı Caltech olan California Teknoloji Enstitüsü'nde çalışmaya başladım ve burada meslektaşım Richard P. Feynman'ı yakından tanıma fırsatını yakaladım. Feynman'ın kuantum fiziğine büyük katkıları olmuştu ve sık sık bana, kuantum mekaniğini kendisi de dahil aslında kimsenin anlamadığını anlatırdı. Her ne kadar bu ifadeyi büyük oranda şaşırtma amacıyla kullanmış olsa da, ilgimi uyandırmayı başarmıştı. Daha derinlemesine anlaşılması gereken bir alanla karşı karşıya olduğumu anladım ve kuantum fiziğinin temel ilkelerini daha derinlemesine irdelemeye başladım.

Kuantum mekaniğinin kati ifadelerde bulunamayıp sadece olasılıklardan söz edebilmesi, dünyamızdaki kararlılığın kuantum fiziğinin tam da bu özelliğine dayanması kadar hayranlık uyandırıcıydı. Anlaşılan olasılık ile kararlılık bir bütündü. Her şey kati olarak belirlenmişse, kararlılık olamazdı. Bu durumun yarattığı hayranlığı tek hissedenlerin fizikçiler olduğunu düşünmüyorum. Bu kitapla kuantum fiziğinin bende uyandırdığı hayranlığı okurlarımla paylaşmayı denemek niyetindeyim.

Fizik tarihi boyunca doğa hakkındaki anlayışımızı derinleştiren bir dizi önemli adım atıldı. Isaac Newton bir taşın yere düşüşüyle gezegenlerin güneşin etrafındaki dönüşünün aynı ilkeyle, kütleçekimle açıklanabileceğini keşfetti.

Michael Faraday ve James Clerk Maxwell, elektriksel, manyetik ve optik fenomenlerin aynı fenomenin, yani elektromanyetik alanın tezahürü olduklarını buldu. Albert Einstein'ın özel görelilik kuramı, zaman ile uzayın bir birlik oluşturduğunu açığa çıkardı. Genel görelilik kuramıysa bu düşünceyi, kütleyi de kapsayacak şekilde genişletti. Zaman ve uzayın eğri olduğu, kütleçekiminin de aslında gerçek bir kuvvet değil, sadece bu eğriliğin bir sonucu olduğu anlaşıldı. Kütleçekim kuvvetinin bu şekilde tersten tanımlanması halen fizikçilerin başına dert olmakta, zira kütleçekim kuvvetinin kuantumlanması (nicemlenmesi) henüz başarılamadı.

Kuantum mekaniği, yukarıda sayılan önemli adımlardan biri, hatta belki de en önemlisidir. 20. yüzyılda doğabilimleri alanında elde edilmiş kazanımların kuşkusuz en başarılısıdır. Fizik alanında, klasik fiziğin modelleriyle açıklanamayacak, örneğin atom, molekül ve atom çekirdeklerinin büyüklükleri, kararlılıkları ve bunların

oluşturduğu kimyasal bağlar gibi çok sayıda fenomen vardır. Kuantum fiziği yardımıyla bu fenomenleri anlamak, sıklıkla da hesaplayabilmek mümkün olmuştur.

Kuantum fiziği 20. yüzyılın başında Max Planck tarafından kuruldu ve izleyen yirmi yıl boyunca temel ilkeleri tam olarak anlaşılmadan varlığını sürdürdü. Başlarında Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli ve Erwin Schrödinger'in bulunduğu son derece yetenekli genç fizikçilerden oluşan küçük bir topluluk yirmili yılların ortalarında, Max Planck, Niels Bohr ve Arnold Sommerfeld'in fikirlerine dayanarak üç yıl gibi kısa bir süre içerisinde kuantum süreçleri ve atomlar hakkında yeni bir öğreti oluşturdu. 1928 yılında Werner Heisenberg 27, Wolfgang Pauli 28, Paul Dirac 26 ve Erwin Schrödinger 36 yaşlarındaydı.

Elinizdeki kitapta kuantum fiziğinin tüm yönlerini kapsamlı biçimde ele almak elbette mümkün değil, ama en azından bu alandaki temel sorunsalları dile getirmeye çalışacağım. Fizik öğrencileri kuantum fiziğini öğrenirken, başta diferansiyel denklemleri ve fonksiyon analizlerini kullanır. Daha geniş bir okur kitlesine yönelik olması arzulanmış bu kitapta bunu yapmak imkân dahilinde değil. Bu sebeple tanım ve tasvirlerde fazla ayrıntıya girmeyeceğim, ancak kuantum mekaniğini okurlara, temel ilkeleri anlaşılacak şekilde aktarabilmeyi umuyorum. Sanırım matematiğe fazla girmeden bunu yapabilirim. Bu yüzden matematik formüllerinden sadece kaçınılmaz olduğunda faydalanacağım. Sorun yaşayan okurlar herhangi bir şeyi kaçırma endişesi yaşamadan formülleri atlayabilir.

Kuantum fiziğinde, klasik mekaniğe göre olanaksız olan süreçler gerçekleşebiliyor. Biyolojik evrim süreci içerisinde geliştirdiğimiz anlayış yetimizle kuantum fiziğinin dinamiğini anlayacak durumda değiliz. Buna rağmen gerçekleşen süreçleri kuantum mekaniği yardımıyla hesaplamak mümkün. Nitekim bu hesapların ortaya çıkardığı sonuçlar, ölçümlerle bire bir örtüşüyor.

Kuantum fiziğinin efendisi, yeni bir doğa sabitidir. Max Planck tarafından bulunan etki kuantumu *h*, klasik fizikte yer almaz. Deney yoluyla $6{,}6 \cdot 10^{-36}$ watt/saniye olarak belirlenen bu katsayı, alışıldık birimler olan watt ve saniye cinsinden ifade edildiğinde son derece küçük kalır. Kuantum fiziğinin tuhaf fenomenlerinin gündelik hayatımızın pratiğinde önemli bir rol oynamamasını buna borçluyuz.

Planck sabiti olarak da bilinen etki kuantumu, adını bu sabitin, etki edilen en küçük birimi temsil etmesinden alır. Fizikte etki, enerji çarpı zamana eşittir. Bunu gözümüzün önünde canlandırmak kolay, zira bir sürecin etkisi, belli bir enerjinin belli bir süre boyunca etki etmesiyle tarif edilir. Bu süre ne kadar kısaysa, uygulanan etki, enerji yüksek olsa bile aynı oranda küçük olacaktır.

Klasik mekanikte bir sürecin etkisi herhangi bir değer alabilirken kuantum fiziğinde bu geçerli değildir. Etki, *h* sabitinin sadece tamsayılı katları şeklinde olabilir ve etki kuantumunun birimleriyle sınırlıdır. *h*'nin üçte biri oranında bir etki söz konusu değildir. Doğa ancak mikro düzeydeki fiziksel alanda kuantumlanmıştır. Max Planck işte bu kuantumlanmayı keşfetti ve salınan bir sistemin enerjisinin sürekli değişemeyeceği, ancak bir değerden bir sonrakine atlayabileceği hipotezini ortaya attı. Etki ancak belli aralıktaki değerlerle var olabilir.

Max Planck bu hipoteze dayanarak sıcak maddelerin ışımasını tarif eden basit bir formül oluşturdu. Demir ısıtıldığında ışımaya başlar. Ne kadar ısınırsa o kadar akkor hale gelecek ve ışık ışıması yayacaktır. Daha önce kimse bu ışımayı matematiksel olarak tanımlamayı becerememişti. Planck aslında bu hipotezi çaresizlik içinde oluşturmuştu ve içten içe fikrinin yanlış çıkmasını umuyordu. Ama fikir işe yaradı ve olağanüstü bir başarı elde etti.

Albert Einstein, Planck'ın fikrini ele alıp ışığın ancak foton tabir edilen küçük paketler (kuantumlar) halinde var olabileceğini açıkladı. O güne değin ışığın bir dalga fenomeni olduğuna inanılmaktaydı. Şimdiyse dalga ve parçacık anlayışının birleştirilmesi gerekiyordu. Louis de Broglie 1923 yılında salt ışığın değil, maddenin tüm parçacıklarının bu ikili özelliğe sahip olduklarını ileri sürdü. Parçacıklar dalga, dalgalarsa aynı zamanda parçacıktı.

Klasik mekanikle kuantum mekaniği arasındaki fark şu örnekle daha iyi anlaşılabilir: Dünya herhangi bir mesafede güneşin etrafında dönebilir. Oysa atom çekirdeğinin etrafında dönen elektronlar için aynı durum söz konusu değildir. Elektronlar dönüşlerini belli yörüngelerde gerçekleştirir. Rasgele yörüngeleri olamaz. Elektron yörüngeleri "kuantumludur". Elektronların bir yörüngeden bir diğerine geçişine "kuantum sıçraması" adı verilir. Ne var ki kuantum dünyasında, klasik mekanikte olduğu gibi sürekli bir geçiş yoktur.

Her şey belli sınır değerler arasındadır, yani kuantumlanmıştır. Ancak ileride, elektronların kesin bir yörüngesinin varlığından söz edemeyeceğimizi de göreceğiz.

Kuantum fiziğinin en temel ifadelerinden biri, elektronun çekirdek etrafındaki hareketini tanımlamak için gereken hız ve yer (konum) gibi fiziksel büyüklüklerin hiçbir zaman kesin olarak ölçülemeyeceği, ancak ilk olarak Werner Heisenberg'in ortaya attığı belirsizlik ilkesince belirlenmiş muğlak aralıklarda aranabileceğidir. Atom içi dinamiğine dair bu yorumun yarattığı sonuçlardan biri, atom içi süreçlerin kesin olarak tanımlanması gerekliliğidir. Bir sürecin gerçekleşip gerçekleşmediğine dair ancak bir tahminde bulunulabilir. Dolayısıyla bir elektronun aynı anda hem yerini hem de hızını tam olarak belirlemek mümkün değildir. Öncelik elektronun yerinin bulunmasına veriliyorsa, hızının tespitinden feragat etmek gerekecektir; aynı durum elektronun hızı için de geçerlidir. Belirsizliğin büyüklüğüyse, etki kuantumu *h* tarafından belirlenir.

Belirsizlik ilkesi makro düzeydeki nesneler, örneğin hareket halindeki bir otomobil için de geçerlidir. Ancak kuantum kuramı tarafından dayatılan, hızla yer arasındaki belirsizlik öylesine küçüktür ki, hesaplamalarda herhangi bir soruna sebep olmadan yok sayılabilir. Doğa süreçlerine dair sezgisel kavrayışımızın, gerçekliğin kuantum doğasını algılamamızı engelleyebilmesinin yegâne sebebi budur.

Oysa atom fiziğinde böyle bir şey mümkün değildir. Örneğin bir hidrojen atomunun büyüklüğünü belirleyen tam da bu belirsizliktir. Her hidrojen atomu ancak komşu hidrojen atomu büyüklüğünde olabilir. Elektronun yerinin atom içerisindeki belirsizliği, yaklaşık $10^{-8}$ santimetrelik atom kabuğu çapı tarafından belirlenir. Örneğin kabuğu bundan 100 kat daha küçük bir hidrojen atomunu gözlemlediğimizi düşünelim. Bu durumda elektronun yeri, normal bir hidrojen atomundakinden çok daha belirgin, hızıysa, yine belirsizlik ilkesi nedeniyle bu kez yerinden yüz kat daha belirsiz olur ve elektron, normal atomdaki ortalama hızının çok üzerinde seyretmek zorunda kalırdı. Ne var ki daha yüksek hız daha çok enerji anlamına geldiğinden bu atomun, normaldekinden daha büyük bir enerjiye sahip olması gerekirdi. Oysa bunu engelleyen önemli bir doğa ilkesi mevcut: Atomlar da dahil olmak üzere her sistem en düşük enerji seviyesinde kalmaya çalışır. Dolayısıyla kararlı olamayan küçük atom,

enerji yaymak suretiyle normal bir atomun ebatlarına ulaşana dek hızla genişleyecektir.

Aynı biçimde normal bir atomdan yüz kat daha büyük yapay bir atom önermesine göz atalım şimdi. Böyle bir atom elde etmek için elektronu çekirdekten uzaklaştırırız. Bu da enerji sarfiyatı anlamına gelir. Bir kez daha, bu kez büyük olan atomun enerjisi normal atomunkinden fazla çıkar. Nitekim bu örnekte de büyük olan atom, normal ebatlarına büzüşecek, yani asgari enerji düzeyine ulaşmaya çalışacaktır. Elektronu daha fazla enerji vermeye zorlayamazsınız. Yani atomların büyüklüklerini belirleyen, yer ile hız arasındaki belirsizlik ilişkisidir. Nitekim dünyadaki bir hidrojen atomuyla Andromeda Galaksisi'nde bulunan bir gezegendeki hidrojen atomu tam da bu nedenle aynı boyuttadır. Evrendeki maddenin kararlılığı, belirsizlik ilkesine doğrudan bağlıdır. Belirsizlik olmasa, kararlı bir maddeden de söz edemezdik.

Aslında daha net ifade edecek olursak, ilkede belirsiz olan hız değil, hız ile kütlenin çarpımı olan momentumdur. Atom kabuğunun büyüklüğü, elektronun kütlesiyle belirlenir. Elektronun kütlesi şu anda doğada olduğundan yüz kat daha küçük olsaydı, atom kabuğu da yüz kat daha büyük, yani bir milimetrenin milyonda biri kadar olurdu. Elektronun kütlesi sadece 0,5 eV, yani yaklaşık olarak bir nötrinonun kütlesine eşit olsaydı, atom kabuğunun ebadı ansızın milimetrenin onda birine eşit olacak oranda büyür ve bizler de atomu mikroskop altında görebilirdik.

Kuantum kuramı tarafından tarif edilen, atomların evrensel ebatları, doğaya önemli bir kararlılık kazandırır. Doğanın sürekli değişikliklere karşın hep aynı biçimleri ortaya çıkarma eğilimi, ister astrofizik alanında olsun ister kimya ya da biyolojide olsun sadece kuantum fiziği çerçevesinde anlaşılabilir.

Kuantum mekaniksel belirsizlik nedeniyle elektronun atom kabuğundaki hareketini takip etmek olanaksızdır. Nitekim kuantum mekaniği bize, bir elektron yörüngesinden bahsetmenin bile anlamsız olduğunu söyler. Elektronun çekirdeğin etrafındaki belli bir uzayda var olma olasılığından söz edilebilir.

Normal haldeki bir hidrojen atomu bu durumu anlamamızı kolaylaştırır. Burada olasılık dağılımı kesinlikle kavisli bir yörüngeye işaret etmez. Olasılık dağılımı daha ziyade küresel simetriktir ve en

yüksek olduğu nokta, protonun bulunduğu atom çekirdeğidir.

Olasılık dağılımı, kuantum kuramı denklemleri yardımıyla kesin biçimde hesaplanabilecek bir fonksiyon olan, elektronun dalga fonksiyonu tarafından verilir. Bu dalga fonksiyonu atomun durumunu tarif eder. Kulağa ne kadar tuhaf gelse de, kuantum kuramı çerçevesinde olgular hakkında kati ifadelerde bulunulamaz, sadece olasılıklardan söz edilebilir. Ancak bu olasılıklar katidir.

Hidrojen atomunu klasik fizikle tarif etmek istesek, protonun etrafında hareket eden elektrona belli bir açısal momentum atfedilir. Ne var ki, kuantum mekaniğinde temel haldeki bir hidrojen atomuna ait elektronun herhangi bir açısal momentuma sahip olmadığı ortaya çıkmıştır. Klasik mekaniğin öngördüğü şekilde doğrusal bir yörüngede de bulunmaz, daha ziyade atom çekirdeğinin etrafında salınır.

Kuantum kuramının yine parçacık fiziğinde tezahür eden bir başka tuhaflığı da uyarılmış hallerin varlığıdır. Bir hidrojen atomuna örneğin elektromanyetik dalgalarla enerji verildiğinde, elektron kısa süreliğine daha yüksek enerjiye tekabül eden başka bir hale geçer. Bu gibi durumlara uyarılmış hal adı verilir ve bunların son derece kendilerine özgü enerjileri vardır. Kesikli bir enerji tayfından bahsetmemizin nedeni budur.

En düşük enerji hali, sistemin temel hali olarak adlandırılır. Atom uyarıldığında bir anlamda uyarılmış bir enerji haline sıçrar ama burada sadece kısa süre kaldıktan sonra yeniden eski haline geri sıçrar ve bu esnada serbest kalan enerji ışık ya da başka bir elektromanyetik ışıma, örneğin röntgen ışınları şeklinde yayılır. Böyle bir uyarılmanın gerçekleşebilmesi için, atoma uyarılma için gerekli tam enerji miktarı uygulanmalıdır. Kuantum mekaniği bu uyarma enerjisini kesin biçimde hesaplayabilmemizi sağlar.

1924 yılında Wolfgang Pauli, sonradan kendi adıyla anılacak olan dışlama ilkesi adında tuhaf bir öneri ortaya attı. Buna göre atom kabuğunda yer alan iki elektron, aynı kuantum sayısına sahip olamaz. Bu ilke yardımıyla hem atom kabuklarının yapısını anlamak mümkün oldu hem de Dimitri Mendeleyev tarafından geliştirilmiş elementlerin periyodik cetvelini anlamamızı sağlayan kuramsal bir çerçeve oluşturulabildi.

Kuantum mekaniğinin sanayideki kullanım alanı geniştir. Modern katı hal fiziğini kuantum fiziği olmadan tasavvur etmek bile

mümkün değildir. Kuantum fiziği sayesinden transistörler imal edilebildi, modern bilgisayar ve cep telefonunu da kuantum fiziğine borçluyuz. Atom çekirdeklerinin davranışını anlamak için de bu bilim dalına ihtiyacımız var. Atom ve hidrojen bombalarının inşa edilebilmesinin nedeni, kuantum mekaniğinin çekirdek süreçlerine uygulanabilmesidir. Gerek güneşimizde gerekse diğer yıldızlarda enerji üretimi de kuantum kuramı uyarınca gerçekleşiyor. Kuantum kuramı evrende yaşamın temel ilkelerini tarif ediyor.

Kuantum fiziğinin önemi salt mikroskobik boyutla kısıtlı değil. Çoğu zaman farkında bile olmasak da gündelik hayatımızın içine nüfuz etmiş durumda. Başında oturduğunuz masanın sağlamlığını kuantum fiziği olmadan anlayamayız. Tüm kimya ve moleküler biyolojinin temeli kuantum kuramına dayanır. Atomların nasıl birleşip moleküller meydana getirdiğini, bitkilerin güneş ışığını enerjiye çevirmelerini sağlayan fotosentezi ancak onun sayesinde anlayabiliriz. Tıpta kullanılan MR ya da göz ameliyatlarında devreye giren lazerler de kuantum fiziği ilkelerine dayanmaktadır.

Yeni kuantum fiziği, nedenselliğin birçok temel bileşenini gözden geçirmemize neden olmasıyla felsefi açıdan da son derece ilginç bir alan. Nedensellik ilkesi, her sonucun temelinde bir neden yattığını öne sürer. Newtoncu fizikte nedensellik anlaşılır bir olgudur. Bir parçacığın belli bir andaki yeri ve momentumu belliyse, parçacığa etki eden kuvvetlerin bilinmesi durumunda hareketin gelecekte nasıl olacağı mekanik denklemleri aracılığıyla kesin olarak hesaplanabilir. Klasik mekanik temel alındığında özgür iradenin olmadığı, kesin olarak belirlenmiştir.

Kuantum fiziğindeyse bu durum geçerli değildir. Belirsizlik ilkesi nedeniyle şimdiyle gelecek arasındaki nedensellik ilişkisi ortadan kalkar, kuantum mekaniğinin yasaları istatistik bir nitelik kazanır. Radyoaktif bir çekirdeği gözlemlediğimizde bunun ne zaman bozunacağını kesin olarak söyleyemeyiz. Tek bildiğimiz çekirdeğin ömrünün yaklaşık on dakika olduğudur. Daha kesin bir ifadede bulunamamamızın sebebi bilgisizliğimiz değil, ilk olarak Bohr ve Heisenberg'in fark ettikleri üzere bunun ilkesel olarak mümkün olmamasıdır.

Bundan yüz yıl öncesine kadar, gündelik yaşamda rastlanan birçok fenomenin açıklaması bilinmiyordu. Bir kömür parçasının ısıtıldığında önce kırmızı, sonra sarı, en nihayetinde de beyaz renk al-

dığı gözlemle tespit edilmişti, ama o zamanlar kimse bunun nedenini bilmiyordu. Bakır neden kahverengi de gümüş beyaz? Metaller elektriği neden iyi iletir? Suyu oluşturmak üzere oksijenle hidrojeni birbirine bağlayan ne? Neden tüm atomların belli bir ebatları var?

Atomlar hakkındaki bilgimiz arttıkça, açıklanamayan birçok yeni fenomenin olduğu anlaşıldı. Örnek olarak on elektrona sahip neon elementini ele alalım. Neon tepkimeye girmeyen bir element, yani bir soygazdır. Öte yandan on bir elektrona sahip sodyum, bilinen en aktif elementlerden biridir. Yani elektron sayısının yüzde on oranında artmasıyla elementin özellikleri tamamen değişiyor. Gerçekten şaşırtıcı. Ancak kuantum kuramı sayesinde bunun sebebini anlamak son derece kolay.

Sürece dahil parçacıkların hızı nispeten küçük olduğu müddetçe kuantum mekaniği mükemmel biçimde işler. Ancak ışık hızına yakın hızlarda kuram aksamaya başlar ve yerine, kuantum mekaniğini görelilik kuramıyla birleştiren başka bir yapının ikame edilmesi gerekir. Nitekim bu da Werner Heisenberg ile Wolfgang Pauli tarafından geliştirilmiş kuantum alan kuramıdır. QED kısaltmasıyla da bilinen kuantum elektrodinamiği sayesinde elektronlarla fotonlar arasındaki etkileşimi anlamak mümkün olmuştur. Atom çekirdeğini oluşturan proton ve nötronlar arasındaki etkileşimse, günümüzde kuantum alan kuramının farklı ancak QED'ye çok benzeyen bir dalı olan kuantum kromodinamiği (QCD) tarafından ele alınır ve kuarklarla gluonlar arasındaki ilişkiyi tarif eder.

Kuantum mekaniği birçok insana sadece fizikçilerin anladığı bir gizil bilim gibi gelir. Aslında bu görüş doğru değil. Kuantum mekaniği ve fiziğinin temel ilkelerini herkes kavrayabilir. Bilim ve tekniğin her şeyi belirlediği günümüzde, kuantum fiziği son derece önemli bir konuma sahip ve bu nedenle geniş kitlelerce anlaşılması ve kabullenilmesi gerekmekte. Araştırmacıların yanı sıra akademisyenler de bu bilginin aktarılmasından sorumludur.

Doğabilimlerinin kurucuları sahip oldukları bilgileri geniş kitlelere ulaştıracak kitaplar yazmaktan çekinmemiştir. Örneğin Galileo Galilei, üç kişi arasındaki tartışmaları konu alan ünlü *Diyalog* başta olmak üzere, genel okur kitlesi için çok sayıda kitap kaleme almıştır. Nitekim ben de elinizdeki kitabı benzer biçimde yazdım. Kitap Albert Einstein, Richard P. Feynman, Werner Heisenberg, Isaac

Newton ve Bernli çağdaş fizikçi Adrian Haller arasındaki kurmaca tartışmayı tasvir ediyor. Adı geçen fizikçilerin ikisi, Feynman ile Heisenberg son derece önemli kuantum fizikçileriydi. Onlarla şahsen tanışma şansım oldu. Heisenberg doktora çalışmamı yürüttüğüm Münih'teki Max Planck Enstitüsü'nün yöneticisiydi. Feynman' laysa yollarımız Caltech'te kesişti. Yeniden Avrupa'ya döndüğümde beni sık sık Cenevre ve Münih'te ziyaret etti.

Newton'ın kuantumlardan pek anlamadığı aşikâr. Ne var ki diğerleriyle yürüttüğü tartışmanın ardından kuantum fiziğinin ateşli bir savunucusu olacak. Einstein her zamanki kuşkuculuğundan yine vazgeçmeyecek ve itirazlarını her daim hazır tutacak. Feynman ile Heisenberg ise, tıpkı Haller gibi modern kuantum kuramını temsil edecek. İlk sayfalarda konuya Newton kadar uzak olan okur bu tartışmalarda birçok şey öğrenecek ve ümit ediyorum ki, kitabın sonunda tıpkı Newton gibi, kuantum fiziği taraftarı olacaktır. Aralarındaki sohbeti aktarırken Albert Einstein'ın "Önemli olan her şeyi mümkün olduğunca kolay kılmalı, ama daha kolay değil" sözünü kendime düstur edindim.

# Fizikçilerin Yaşamöyküsü

## Albert Einstein

Albert Einstein 14 Mart 1879'da, işletmeci babası Hermann Einstein'la kızlık adı Koch olan annesi Pauline'nin çocuğu olarak Ulm'de dünyaya geldi. Albert'in doğumundan kısa süre sonra, aile 1880 yılında Münih'e taşındı. Hermann Einstein burada ağabeyiyle beraber elektrikli cihazlar üreten bir fabrika (Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie.) kurdu. Einsteinların şirketi Münih'teki Ekim kutlamalarındaki ilk elektrikli aydınlatmadan sorumluydu. Şirket Schwabing semtinin büyük bir kısmına da kablo döşedi.

Albert Einstein 1884'te özel keman dersleri aldı. Ertesi sene okula başladı ve 1888'den itibaren Münih'teki Luitpold lisesine devam etti. Oldukça dikkatli bir öğrenciydi. Derslerinde pekiyiyle iyi arası notlar alıyor, dil eğitiminde fazla başarılı olmasa da, doğabilimlerinde ortalamanın üzerinde not tutturuyordu. Sayısız popüler bilim kitabını tutkuyla okuyup bitiren Albert bu sayede bilimin halihazırda bulunduğu seviye hakkında bilgi ediniyordu.

Doksanlı yılların başında Hermann Einstein'ın şirketi iflas ilan etti. Aile Almanya'yı terk edip Milano'ya yerleşti. Albert eğitimini tamamlamak için tek başına Münih'te kaldı. Ne var ki imparatorluk Almanya'sının disiplin ve düzenle yoğrulmuş okul sisteminden kısa sürede sıkıldığı bir sır değildi. Öğretmenleri Albert'in saygısızlığının diğer öğrencilere de kötü örnek olacağını düşünüyordu. Bu sebeple Einstein 1894 yılında, lise olgunluk diplomasını almadan Milano'ya, ailesinin yanına gitmeye karar verdi.

Bunun ardından bugün İsviçre Teknik Yüksekokulu (Eidgenössische Technische Hochschule, ETH) olan Zürih'teki Politeknik okuluna başvurdu. Olgunluk diploması olmadığından 1895 yazında üni-



Albert Einstein

versite giriş sınavına katılması gerekti ve 16 yaşında en genç katılımcı olarak sınavı geçemedi. Rektörün ve Fizikçi Heinrich Weber'in aracı olmalarıyla ertesi sene liberal bir yönetime sahip Aarau Kanton okuluna başladı ve olgunluk sınavını burada verdi. Bu dönemde yanında kaldığı Winteler ailesinin oğlu Paul 1910 yılında Einstein'ın kız kardeşi Maja'yla evlenecekti. 1896 akademik yılının başlamasıyla Albert Einstein Politeknik üniversitesindeki eğitimine başladı.

Okulu 1900 yılında tamamladığında matematik ve fizik öğretmenliği lisansı almıştı. Zürih'teki Politeknik'in yanı sıra İsviçre'deki diğer üniversitelere yaptığı asistanlık başvuruları reddedildi. Bunun üzerine önce Winterthur'da, ardından Schaffhausen ve Bern'de özel öğretmen olarak çalıştı. 1901 yılında İsviçre vatandaşlığına geçme başvurusuna olumlu cevap verildi. 1902 Haziranında Bern'deki İsviçre patent enstitüsünde 3. derece uzman olarak işe girdi.

Einstein yükseköğrenimi sırasında sonradan eşi olacak, kendinden üç buçuk yaş büyük Sırp Mileva Marić'le tanıştı. İkili 1902 yılında evlendi, iki oğul Hans Albert (1904-1973) ve Eduard (1910-1965) dünyaya geldi ve hep beraber Ekim 1903'ten Mayıs 1905'e kadar Berrn'deki Kramgasse 49 numarada oturdular. Günümüzde bu ev küçük bir müzeye dönüştürülmüş durumda.

Albert Einstein 1905 yılında, 26 yaşındayken en önemli çalışmalarından birkaçını yayımladı. Haziran ayında "Hareketli Cisimlerin Elektrodinamiği" adlı makalesi *Annalen der Physik* adlı dergide yayımlandı. Tamamlayıcı nitelikteki çalışması "Bir Cismin Eylemsizliği Enerji İçeriğine Bağlı mıdır?" adı altında yine aynı dergide çıktı. Söz konusu metin, ünlü $E = mc^2$ formülünün ilk kez geçtiği yerdi. Her iki çalışma da sonradan özel görelilik kuramının temelini oluşturdu.

1909 yılına gelindiğinde Einstein Zürih Üniversitesi'nde kuramsal fizik alanında yardımcı profesör oldu. İki yıl sonra Prag'da Almanca eğitim veren bir üniversiteye geçse de, ertesi yıl yeniden Zürih ETH'ye döndü.

Max Planck 1914 yılının başında Einstein'ı Berlin Königlich-Preußische Bilimler Akademisi'nin eğitimci kadrosuna kazandırdı. Einstein, Berlin'deki Kaiser-Wilhelm Enstitüsü'nde idareci, Berlin Üniversitesi'ndeyse profesör oldu, ancak eğitim verme zorunluluğundan muaf tutuldu. Burada genel görelilik kuramını yayımladı.

1919 yılında karısı Mileva'dan boşandı. Kısa süre sonra, yine Berlin'de yaşayan kuzeni Elsa Löwenthal'la evlendi.

Aynı yılın mart ayında Arthur Eddington yönetimindeki İngiliz gökbilimciler Brezilya'daki gözlemevinde, yıldızlardan gelen ışığın güneş tarafından saptırıldığını gözlemledi ve genel görelilik kuramının öngörülerini teyit etmiş oldu. Einstein bir anda tüm dünyanın tanıdığı bir bilimadamı olmuştu. 1921 yılında görelilik kuramıyla değil, 1905 tarihli fotoelektrik etki çalışmasıyla fizik dalında Nobel Ödülü aldı.

1930 yılında Potsdam'ın Caputh köyündeki Waldstraße'de edindiği arsaya bir yazlık ev inşa ettirdi ve iki yazını burada geçirdi. 1932'de bir sunum seyahati için gittiği ABD'den, ertesi sene Hitler'in Almanya'da iktidara gelmesi nedeniyle geri dönmedi.

1933'te Einstein, kısa süre önce Princeton Üniversitesi yakınlarında kurulmuş özel bir araştırma kurumu olan İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün üyesi oldu. Ağustos 1935'ten ölümüne dek Princeton'daki Mercer Sokağı 112 numarada ikamet etti. Princeton dönemin modern araştırmalarının bir mikrokozmosu sayılıyordu. Einstein kısa sürede kütleçekimini (genel görelilik) elektromanyetizmayla birleştireceğini umduğu Birleşik Alan kuramını araştırmaya başladı ve "dünya

formülü" tabir edilen bu denklemi öldüğü güne dek aradı.

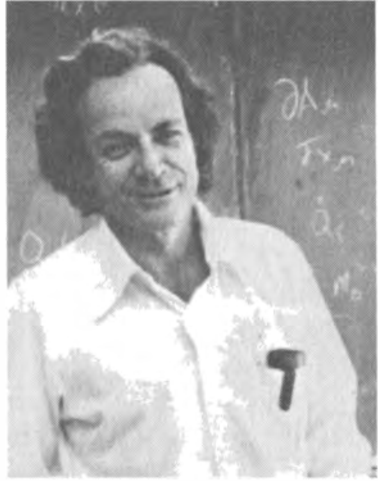
Otto Hahn ve Lise Meitner'ın Berlin'de 1938'de fisyon tepkimesini keşfetmesi, bilim çevrelerinde nükleer tehdide dair endişeler yarattı. 1939'da, İkinci Dünya Savaşı'nın başlamasından hemen önce Einstein, ABD Başkanı Franklin D. Roosevelt'e gönderilmek üzere Leo Szilard tarafından kaleme alınmış olan, Almanya'nın büyük olasılıkla geliştirmeye başladığı ve kısa sürede sahip olacağı "yeni tür bir bombaya" dair uyarılar içeren mektubun altına imzasını koydu. Uyarının anlamını kavramakta gecikmeyen Roosevelt'in emriyle araştırma bütçeleri oluşturuldu ve atom bombası geliştirme hedefiyle gizli Manhattan Projesi hayata geçirildi. Einstein anılarında, bu mektubu imzalamakta fazla aceleci davrandığını belirtecekti.

Atom bombası çalışmalarına Einstein hiçbir noktada iştirak etmedi: Bilimsel önceliklerini başka alanlara yöneltmişti, zira nükleer teknolojiyi mümkün kılan kuantum kuramına yıllarca kuşkuyla yaklaşmış olması bir yana, komünizme karşı gizlemeye gerek görmediği sempatisi yüzünden bir güvenlik riski olarak görüldüğü için ABD gizli servisi tarafından gözetim altında tutuluyordu. Dolayısıyla kendisi tarafından ifade edilmiş madde-enerji dönüşümünün ilk askeri uygulamasını çoğu insan gibi radyodan işitti: Atom bombalarının savaş alanındaki ilk kullanımı olan 6 ve 9 Ağustos 1945 tarihlerinde, Japonya'nın Hiroşima ve Nagasaki kentlerinde yaşayan yüz binlerce insan hayatını kaybetti. Savaşın ardından Einstein uluslararası silahlanma denetimini destekledi. 1952 yılında İsrail devleti kendisine cumhurbaşkanlığı makamını teklif etse de Einstein teklifi reddetti.

Albert Einstein 18 Nisan 1955 tarihinde, 76 yaşında Princeton'da hayata gözlerini yumdu.

## Richard P. Feynman

Richard Feynman 11 Mayıs 1918'de New York yakınlarındaki Far Rockaway'de dünyaya geldi. 1935 yılına kadar burada yaşadı, ardından üniversite eğitimi için Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ne (MIT) gitti. 1939 yılında Princeton'a geçiş yaptı ve John Wheeler yönetiminde doktorasını tamamladı. Doktora tezinde, Nobel Ödüllü fi-



Richard P. Feynman

zikçi Paul Dirac'ın bir fikrine dayanarak geliştirdiği kuantum mekaniğinin fonksiyon entegral formülünü işledi.

Doktora tezini 1943 yılında tamamlamasıyla çoğu meslektaşı gibi Manhattan projesi üzerinde çalışmak üzere Los Alamos'a gitti. Feynman New Mexico'daki Alamogordo'da gerçekleştirilen ilk atom bombası denemesinin birinci elden tanıklarından biriydi.

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından New York eyaletinin Ithaca kentindeki Cornell Üniversitesi'nde kuramsal fizik profesörü oldu. 1951'deyse Pasadena'daki California Teknoloji Enstitüsü'ne (Caltech) geçti. Doktorası esnasında Feynman 1942 yılında kız arkadaşı Arlene Greenbaum'la evlendi. Arlene üç yıl sonra tüberkülozdan hayata veda etti. Feynman toplam üç kez evlendi. Üçüncü karısı Gwyneth'ten Carl ve Michelle adında iki çocuğu oldu.

Feynman'ın başta kuantum elektrodinamiği, çekirdek fiziği, parçacık fiziği ve katı hal fiziği gibi modern fiziğin birçok alanına önemli katkıları oldu. Nitekim 1965 yılında Julian Schwinger ve Siniçiro Tomonaga'yla beraber kuantum elektrodinamiği alanındaki katkılarından dolayı Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Feynman artık döneminin en önemli kuantum fizikçisiydi.

En başarılı olduğu hususlardan biri karmaşık konu ve içerikleri birkaç temel görüşe indirgeyebilme yetisiydi. Kuantum elektrodina-

miğindeki kuantum fenomenlerinin, günümüzde Feynman diyagramları olarak bilinen tablolarla ifade edilebileceğini keşfetti. Fizik hakkındaki "Feynman Dersleri" günümüzde hâlâ önemini koruyan çalışmalardır.

Altmışlı yılların sonlarına doğru Feynman, Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nde (SLAC) yürütülen deneylerin ilginç sonuçlarını, kendisi tarafından geliştirilmiş parton modeli sayesinde açıklamayı başardı. Kısa süre içinde partonların kuark ve gluonlarla aynı olduğu anlaşıldı. Feynman bunların ötesinde yeni bir kuram olan güçlü etkileşim, yani kuantum kromodinamiğiyle yakından ilgilendi. Ölümünden üç hafta öncesine kadar Caltech'te bu konuda eğitimler vermeyi sürdürdü.

ABD Başkanı Reagan, Feynman'dan 1985'te yaşanan Challenger felaketini araştırmakla görevli araştırma komisyonuna katılmasını istedi. Feynman patlamanın sebebini bulmayı başardı.

Richard P. Feynman 15 Şubat 1988'de kanser nedeniyle Los Angeles'ta öldü.

## Werner Heisenberg

Werner Heisenberg 5 Aralık 1901 günü Würzburg'da dünyaya geldi. Akademik geleneğin baskın olduğu bir ailede büyüdü. Babası August Heisenberg 1910'da Münih Üniversitesi'nde ortaçağ filolojisi profesörü oldu. Werner 1920 yılında liseyi bitirdikten sonra Arnold Sommerfeld'in kılavuzluğunda Münih Üniversitesi'nde fizik eğitimine başladı. Üç yıl sonra doktorasını aldı. Bunun ardından Max Born'un grubunda çalışmak üzere Göttingen'e gitti ve ertesi sene Niels Bohr tarafından ucu açık bir süreliğine Kopenhagen'e davet edildi.

1923 yılında atom düzeyindeki fenomenlerin kuramsal ilkeleri henüz anlaşılmamıştı. Heisenberg ve dostu Wolfgang Pauli, Bohr ve Sommerfeld'e ait eski atom kuramının temel tasarımlarından, özellikle de atom içindeki elektron yörüngeleri anlayışından uzaklaşılması gerektiği görüşündeydi. Bu düşünceler çerçevesinde Heisenberg kuantum mekaniği için yeni bir biçimcilik geliştirmeye koyuldu.

Haziran 1925'te saman nezlesinden mustarip olduğu için gittiği



Werner Heisenberg

Helgoland'da, geliştirdiği yeni biçimciliğin atomun niteliklerini tanımlamada başarılı olduğunu gördü. Bugünkü haliyle kuantum mekaniğinin doğduğu andı bu.

1927 yılında Niels Bohr'un asistanıyken atomların görünümünde daima bir belirsizlik olduğunu keşfetti. Bir parçacığın hem yerini hem de momentumunu aynı anda ölçebilmek, daima var olan belirsizlik nedeniyle mümkün değildi. Bunu açıklamak için ünlü belirsizlik denklemini geliştirdi: $\Delta p \times \Delta q \approx h$. Tam da bu sebeple atom kuramı içerisinde kati bir nedensellikten söz edilemezdi. Yeni kuantum kuramı en başından itibaren bir olasılık kuramıydı. Bunu ilk fark eden, Heisenberg'in Göttingen'deki hocası Max Born oldu.

Heisenberg 1927 sonbaharında, henüz 26 yaşındayken Leipzig Üniversitesi'nden profesörlüğünü aldı. Artık tüm ilgisini atom kuramının, göreliliği kapsayacak şekilde genişletilmesine vakfedebilirdi. Pauli'yle beraber 1929 yılında göreli kuantum alan kuramını, özellikle de bunun içerisindeki kuantum elektrodinamiğini geliştirdi.

1932 yılında nötronun keşfedilmesiyle Heisenberg atom çekirdeğine ve buradaki güçlü etkiye dair birçok ayrıntıyı ortaya çıkardı. Aynı zamanda yüksek enerjili tepkimelerde görülen etkilerin varsayımsal penetrasyonu üzerine eğildi. Aynı yıl, daha 31 yaşındayken Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.

Heisenberg 1942'de Berlin'deki Kaiser-Wilhelm Fizik Enstitüsü'ne gitti ve burada ağırlıklı olarak atom reaktörlerinin geliştirilmesi üzerinde çalıştı. Reich Başbakanı Hitler'in emriyle atom bombasının geliştirilmesi görevini de üstlenmesi gerekiyordu ama bunu baskı altında ve gönülsüzce yaptı. Üstelik bombanın çalışmayacağına dair derin bir inancı vardı.

Savaşın bitişinden kısa süre sonra diğer fizikçilerle beraber İngiltere'de hapse kondu. Burada bulunduğu sırada Hiroşima ve Nagasaki'ye atılan atom bombalarının haberini aldı. ABD'nin bu bombayı geliştirmeyi başarmış olmasına şaşırmıştı.

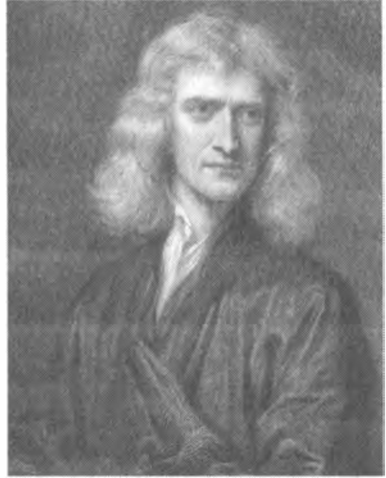
Savaşın ardından Almanya'da bilim çalışmalarını yeniden güçlendirmek için büyük çaba gösterdi. Göttingen'deki Max Planck Enstitüsü'nün, onun isteği üzerine atmışlı yılların başında Münih'e taşınan yeni fizik bölümünün ilk yöneticiliğini yaptı. Cenevre'de bulunan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nin (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire ya da kısa adıyla CERN) kurucu üyesiydi. Alexander-von-Humboldt Vakfı'nın başkanı olarak dünyanın dört bir yanından genç araştırmacıları Almanya'ya davet etti.

Werner Heisenberg 1 Şubat 1976'da Münih'te öldü.

## Isaac Newton

Isaac Newton 4 Ocak 1643 tarihinde İngiltere'deki Woolsthorpe-by-Colsterworth'ta dünyaya geldi. Annesi ve anneannesi tarafından yetiştirildi, önce köy okuluna, ardından komşu kasabada Latince eğitim veren Grantham'daki okula devam etti. Papaz olan amcalarından birinin teşvikiyle genç Isaac babasının çiftliğini devralmaktansa, güçlü bir eğilim duyduğu matematik çalışmalarına ve deneysel araştırmalara yöneldi. Newton 18 yaşındayken Cambridge Üniversitesi'ne başladı. Hocası, doğabilimleri kürsüsü başkanı Isaac Barrow ondaki yeteneği görmekte gecikmedi.

Veba 1665 yılında İngiltere'ye sıçradığında Newton iki yılını Lincolnshire'daki evinde geçirdi. Burada düşünmek için bolca vakti vardı. Gerek sonsuz küçükler hesaplaması, gerekse optik ve mekanik konusundaki önemli başarılarının temeli bu döneme dayanmaktadır. Newton bunun ardından akademik merdivenin basamak-


Isaac Newton

larını hızla tırmandı ve 1669 yılında, daha 26 yaşındayken Barrow' un halefi olarak kürsü başkanlığına getirildi.

Newton tüm zamanların en büyük doğabilimcilerinden biri kabul edilir. Dinamik, optik, gökyüzü mekaniği, matematik ve kimya gibi disiplinlere sağladığı katkıların yanı sıra, doğabilimleri yardımıyla kurmuş olduğu dünya görüşünün iki yüzyıl boyunca sarsılmadan ayakta kalmayı başarmış olması en büyük başarısını teşkil eder. Matematikte özellikle sonsuz küçükler hesaplaması ve cebir alanındaki çalışmaları öne çıkmıştır. Elbette matematik alanındaki başarıları büyük bir öneme sahip olsa da, fizikteki kadar devrimci nitelikte olmamıştır. Newton fizik anlayışını, örneğin eylemsizlik ilkesini Galileo Galilei'ye dayandırmıştır.

Newton *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri) adlı eserinde kütleçekim yasalarını geliştirdi ve bunların Kepler yasaları açısından önemini kanıtladı. Kütleçekim katsayısını evrensel bir doğa sabiti olarak yürürlüğe soktu ve Kepler yasaları yardımıyla hesaplanan gezegen hareketlerini, doğrudan kütleçekim yasasından yola çıkarak buldu. Cisimlerin hareketlerine dair temel yasalar ve mutlak zaman ve mutlak uzay tasarımları ilk kez Newton tarafından tarif edildi. Hepsi bir araya toplandığında, ortaçağın son dönemlerinde fizik alanında var olan tüm

temel ilkeleri oluşturuyordu aslında. Bu halleriyle de 200 yıldan uzun süre boyunca doğabilimsel dünya görüşümüzün temelini oluşturdular.

31 Mart 1727 tarihinde Kensington'da hayata gözlerini yuman Isaac Newton Londra'daki Westminster manastırına gömüldü.

# 1

# Berlin'e Varış

Bern Üniversitesi'nde fizik profesörü olan Adrian Haller, kısa adı BBAW olan Berlin-Brandenburg Bilimler Akademisi'nin Berlin'de gerçekleştirilecek bir oturumuna katılma davetini kabul etmiştir. Daha önceki ziyaretlerinden farklı olarak bu kez trenle seyahat edecektir. Bern'den kalkan tren Basel, Frankfurt, Fulda ve Braunschweig üzerinden Berlin'deki yeni tren garına varacaktır. Haller yolda kitabını okur ama giderek üzerine bir ağırlık çökmeye başlar. Kitabını bir kenara bırakmasıyla kısa sürede uykuya dalar...

Tren tam vaktinde Berlin Hauptbahnhof'a girdi. Haller buradan Friedrichstraße'deki istasyona gitti ve yeraltı trenine geçti. Französische Straße İstasyonu'nda indikten sonra yukarı, Gendarmenmarkt Meydanı'na çıktı ve yolun karşısındaki Gendarm Oteli'ne girdi. Kendisini nazikçe selamlayan resepsiyondaki kadından, oturum için gelmiş olan diğer dört beyin bir süredir kendisini beklemekte olduğunu öğrendi.

"Beyefendilerden biri uzun, beyaz saçlı mı?" diye sordu Haller.

"Evet, sanırım kendisini bir yerlerde görmüşlüğüm var. Adı Einstein'mış, tıpkı ünlü Albert Einstein gibi. Belki de bir akrabasıdır. Diğer beyefendi sadece İngilizce konuşuyor. Muhtemelen İngiliz ya da Amerikalı – adı Newton. Üçüncüsü Heisenberg adında, güney aksanlı, nazik, yaşlıca bir bey. Dördüncü konuğumuzsa anladığım kadarıyla Amerikalı, hoş görünümlü ve son derece çekici bir beyefendi. İsmi de Richard P. Feynman."

"Evet," dedi Haller, "beyefendilerin kim olduklarını tahmin edebiliyorum. Hangi odalarda kalıyorlar?"

"Herr Einstein'a 13 numaralı odayı verdik, Newton 17 numaralı odayı tercih etti, Herr Heisenberg 18'de, Mr. Feynman 20 numarada. Sizin odanız ikisinin arasında, 19 numara."

Haller birinci kata çıkan merdivenleri çıktı, odasına yerleşti ve birkaç dakika sonra komşu odanın kapısını tıklattı.

"İçeri gelin Herr Haller, hoşgeldiniz," diye seslendi birisi içeriden.

Haller kapıyı açtı. İçerideki kanepede Einstein, Newton ve yaşlıca bir adam oturuyordu, ama Haller Heisenberg'i yetmişli yıllarda sık sık gördüğünden ona da yabancı değildi. Werner'in yanındaki iskemleye, Haller'in Caltech'te geçirdiği dönemde yakinen tanıdığı, kendisini Bern'de mükerrer defalar ziyaret etmiş olan Dick Feynman yerleşmişti.

**FEYNMAN:** Adrian, kapıdakinin siz olduğunu nasıl anladığımıza şaşırmış olmalısınız, ama inanın bana bunun çok basit bir açıklaması var – resepsiyoncu hanımefendi arayıp bizi önceden haberdar etti.

**HALLER:** Evet, zaten ben de sizlerin Gendarm Oteli'ne çoktan geldiğinizi tahmin etmiştim.

**EINSTEIN:** Çok güzel bir otel seçmişsiniz. Berlin'in eski merkezinde. Üniversiteye yürüyerek gittiğim zamanlarda yolum Tiergarten parkından ve Gendarmenmarkt'tan geçerdi. Devlet operasına da iki dakikalık yol. Benim zamanımda Gendarmenmarkt'a henüz Hilton Oteli inşa edilmemişti, ama iki güzel kilise ve elbette aralarındaki konser salonu o zaman da buradaydı.

**HALLER:** Eskiden Berlin Königlich-Preußische Bilimler Akademisi olan BBAW binasını da bilmiyorsunuz. Orası da Gendarmenmarkt'ta. Akademi üyesi olarak orada sıklıkla bulundum. Yarın sabah erkenden gitmeyi öneriyorum. Orada bize sohbetimizi sürdürecek bir ofis tahsis edeceklerini düşünüyorum. Sizlerin de bildiği üzere kuantum fiziği hakkında konuşacağız.

**HEISENBERG:** Savaş öncesinde Berlin'e ve akademiye sık sık gelirdim. O zaman başka bir binadaydı elbette. Yani yeni binayı yarın ilk kez göreceğim.



Berlin'deki Gendarmenmarkt

**HALLER:** Evet, Prusya Bilimler Akademisi'nin eski binası günümüzde devlet kütüphanesi olarak kullanılıyor, Unter den Linden, 8 numarada. Bina hâlâ yerli yerinde. Fırsattan istifade oranın da önünden geçeriz. Fakat şimdi geç oldu, yol yorgunuyum. O yüzden odama çekilmek istiyorum. Yarın sabah kahvaltıda görüşmek üzere.

Ne var ki Haller hemen odasına çıkmadı, önce Gendarmenmarkt'ta bir yürüyüş yaptı, eskiden tiyatro olan konser salonunun ve iki kilisenin önünden geçti. Anacadde Unter den Linden boyunca yürüdü, devlet opera binasını ve Humboldt Üniversitesi'ni gördü. Üniversite binasının duvarındaki, Max Planck'a ithaf edilmiş plaket dikkatini çekti. Fiziğin en büyük şahsiyetlerinden olan Planck bu binada çalışmış ve kuantum fiziğinin temellerini oluşturan fikirleri burada geliştirmişti.

Haller Planckstraße boyunca yürüyüp önce Friedrichstraße İstasyonu'na, ardından Brandenburg Kapısı'na vardı. Sonunda ayakları onu Soykırım Anıtı'na götürdü. Burası Almanya'daki nasyonal sosyalizmin karanlık dönemini hatırlatması için dikilmiş 2 bin 700 beton bloktan meydana geliyordu.

Brandenburg Kapısı yakınlarındaki Adlon'da bir bira içti. Bu otelin geçmişi Weimar Cumhuriyeti'ne kadar uzanıyordu. İkinci Dünya Savaşı sırasındaki bombardımanlarda yıkılmış, iki Almanya'nın birleşmesi akabinde eski üslupta yeniden inşa edilmişti. Haller gecenin sonunda Gendarm Oteli'ne döndü.

# 2

## Kuantum Kuramının Başlangıcı

Ertesi sabah beş fizikçi kahvaltılarını birlikte yaptı. Ardından Gendarmenmarkt'ı kat edip hemen yandaki Jägerstraße'deki Akademi binasına girdiler. Haller yakından tanıdığı Akademi başkanını görmeye gitti ve ondan şu sıralar boş duran ve kullanmalarına izin verilen ofisin anahtarını aldı.

Burası geniş bir ofis odasıydı; içeride birkaç koltuk, kocaman bir masa ve bir yazı tahtası vardı ve oda büyük bir balkona açılıyordu. Fizikçiler balkona yerleşti, altlarında Akademi binasının avlusundaki bahçe uzanıyordu.

**HALLER:** Kuantum kuramı hakkında, hem de kuantum fiziğinin beşiği sayılan Berlin'de bir sohbete katılmak gerçekten heyecan verici. Günün birinde böyle bir şey yaşayacağımı hayal bile edemezdim.

**EINSTEIN:** Evet, gerçekten de kuantum fiziğinin doğum yerindeyiz. Kuantum fiziği, Birinci Dünya Savaşı öncesi Berlin'in bir ürünü. Max Planck, en fazla yüz metre ilerideki üniversitede bu alandaki ilk adımları atmıştı. Dün bir yürüyüşe çıkıp oradan geçtim. Planck'ın çalıştığı binaya bir plaket bile yerleştirilmiş. Anlaşılan Berlinliler Max Planck ile haklı olarak gurur duyuyorlar. Hatta üniversitenin yakınlarında bir de Planckstraße (Planck Sokağı) var.

**HALLER:** Kentin kuzeybatı kesiminde, Planckstraße kadar merkezi konumda olmasa da Einsteinstraße var. Ne de olsa siz de, Herr Einstein, Bern'de ışık paketlerini keşfetmek suretiyle kuantum fiziğine büyük bir katkı sağladınız. Sonra 1913'te de buraya, kuantum fiziği-

nin başkentine geldiniz. Almanya'nın başkentine gelmenizin nedenini pek anlamadım aslında, zira öğrenci olarak Almanya'yı terk etmiştiniz. Kararınızı değiştirmenizde Max Planck'ın da bir etkisi olmuştur herhalde, değil mi? Öte yandan Zürih'te kalmış olsaydınız, sonradan başınız pek derde girmezdi. Adolf Hitler'in Zürih'le bir alıp veremediği yoktu.

**EINSTEIN:** O dönemde teklif bir mektupla gelmiş olsaydı, büyük olasılıkla reddederdim. Ama Max Planck bizzat, yanında Walther Nernst'le beraber Zürih'e geldi. Bir düşünün, Zürih'teki Teknik Üniversite'de genç bir profesör için ne büyük bir onur! Alman fiziğine ışık tutan iki büyük fener benim için Zürih'e geliyor, inanılacak gibi değildi. Bana bu teklifi getiren Planck'a şöyle dedim: Zürichberg'e gidip teklifinizi düşünmek için bana bir saatliğine izin vermenizi rica ediyorum. Eğer bir saat içinde gelir, elimde de bir demet çiçek tutuyor olursam, sizinle Berlin'e geleceğim demektir.

Nitekim dediğimi yaptım da. Aslında fazla düşünmeme gerek kalmadı, zira Berlin'e zaten gitmek istiyordum. Burası Avrupa fiziğinin odak noktasıydı. Kuzenim Elsa da bu kentteydi. Yine de Planck'ın beni bu kadar kolay ikna etmesini istememiştim. Dolayısıyla dönüşte yanımda çiçek götürmedim. Planck hayal kırıklığına uğramıştı ve koşulları yineledi. Bu kez iki kürsüde profesörlük veriyordu, birisi üniversitede, diğeri Akademi'de.

Tekrar Zürichberg'e çıktım. Geri çevrilecek teklif değildi doğrusu. Bu kez malum çiçekleri aldım ve Planck, onunla Berlin'e geleceğimin bir işareti olan demeti elimde görünce son derece sevindi. Bana olağanüstü koşullar sunmuştu. Berlin'de ders vermem gerekmeyecek, aynı zamanda Zürih'tekinden ve Berlin'deki meslektaşlarımın sahip olduğundan çok daha iyi bir gelirim olacaktı.

Mevki bana resmi olarak Alman Kayzeri 2. Wilhelm tarafından verildi. Almanya'nın ertesi yıl korkunç bir dünya savaşına gireceğini o zaman bilmem mümkün değildi. Almanların, kaybedecekleri aşikâr olan bir savaşı başlatacak kadar aptal olduklarını gerçekten düşünmemiştim. Üstelik yirmi beş yıl sonra aynı hataya bir kez daha kalkışıyorlardı, deliliğin de bu kadarı. İsviçre'de kalsaydım hayatım daha sakin olurdu, o konuda haklısınız. Ancak Hitler başbakan olduğunda küçük İsviçre'mizi rahat bırakıp bırakmayacağı belli değildi. Zürih'te de kendimi rahat hissetmezdim muhtemelen.

Evet, orada kalsaydım hayatım kim bilir nasıl olurdu. Herhalde iyi bir hayat sürdürürdüm, nasyonal sosyalizm döneminde de sıkıntı çekmezdim. ABD'ye gitmeme de gerek kalmazdı – hayat daha sakin olurdu. Ama Zürih'te yaşamam, eşim Mileva'ya da yakın olmam anlamına gelirdi ki, bunu da pek arzu etmezdim.

**FEYNMAN**: Hayatınız süresince ETH Zürih'te profesörlük yapardınız – Princeton'a iyi bir alternatif diye düşünüyorum. Ama şimdi yaşamöykülerimize dair ayrıntıları bir kenara bırakalım. İstesek de geçmişi değiştiremeyiz. Hepimiz kendi hatalarımızdan sorumluyuz.

**HEISENBERG**: Sohbetimizde nasıl bir yol izleyeceğimiz konusunda net bir fikrim yok açıkçası. Önerim tarihsel yolu takip edip ilk iş olarak Planck hipotezini tartışmak, ardından Niels Bohr'un hidrojen atomu konusundaki fikirlerine değinmek ve oradan önce de Broglie' nin parça ve dalga sorularını irdeleyip sonra modern kuantum mekaniğine geçmek. En azından Newton'ı düşünerek böyle bir yol izlemenin daha doğru olduğu kanısındayım. Ne de olsa kuantum kuramı hakkında hiçbir fikriniz yok, değil mi?

**NEWTON**: Evet, tarihsel yolu izlemek bana da daha akıllıca geliyor. Dolayısıyla önce benim mekanik anlayışımdan başlayalım.

Ama hepsinden evvel Max Planck'a dair bir sorum olacak. Nasıl oldu da Berlin'de olduğu sırada kuantum fiziğini keşfetti? Okuduklarımdan anladığım kadarıyla Planck oldukça muhafazakâr biriymiş; üstelik kuantum mekaniğine önemli katkılar sağladığı sırada kırklarında, yani normal koşullarda insanların pek yeni kuramlar üretemediği bir yaştaymış. Kuantum kuramını neden Albert Einstein gibi genç bir kuramcı değil de, muhafazakâr, pek o kadar genç sayılmayacak Planck buldu?

**EINSTEIN**: Planck 1900 yılında 42 yaşındaydı, çok yaşlı sayılmasa da genç bir dimağ olduğu da söylenemez. Fizikte çığır açıcı yeni kuramlar çok genç, genellikle otuz yaşın altında insanlar tarafından geliştirilir. Görelilik kuramını ortaya attığımda henüz 26 yaşındaydım, ama Planck farklı biri, gelişimini geç tamamlayanlardan. 42 yaşındayken henüz bir çocuk sayılırdı. İnsan hayatı boyunca çocuk kalabilmeli, o zaman hep iyi fikirler üretebilir.

**HALLER**: İlerleyen yaşlarda olağanüstü araştırmalar yayımlayan fizikçiler tanıyorum, örneğin sizin gibi Mr. Feynman. Bazı fizikçiler

nasıl oluyorsa tüm yaşamları boyunca genç kalmayı başarıyor, ama bunun için asla tam yetişkin olmamayı öğrenmek gerek. En azından hiçbir zaman yetişkinliğe adım atmıyor ve yeni, genellikle gündemde olmayan fikirlerle uğraşıyorlar. Caltech'te geçirdiğimiz dönemde beraber bir sürü haylazlık yaparken bir yandan da harika fizik çalışmaları yürüttük.

Biz yeniden konumuza dönelim. İsterseniz önce hepimiz kendini tanıtsın. Herkes kuantum fiziğiyle ilişkisi hakkında birkaç söz etsin. Arzu ederseniz ben hemen başlayayım. Ben, Adrian Haller. Bern Üniversitesi'nde kuramsal fizik profesörüyüm. Kuantum fiziğini seviyorum ve bu alanla ilgili sık sık sunum yapıyorum. Ağırlıklı çalışma alanımsa temel parçacıklar. Bunun için Cenevre'deki Avrupa Parçacık Fiziği Araştırma Merkezi CERN'de bolca vakit geçiriyorum.

**NEWTON:** Bana dair söylenecek pek bir şey yok. İngiltere'den geliyorum ve tüm dünyada klasik mekaniğin babası kabul ediliyorum, her ne kadar İtalyan Galileo Galilei bu konuya büyük katkı sağlamış olsa da. Kuantum fiziğinden hiçbir şey anlamıyorum, ama umarım bu durum kısa sürede değişecek.

**EINSTEIN:** ETH'taki eğitimimin ardından maalesef akademik bir mevki alamadım ve bunun sonucunda Bern Patent Enstitüsü'nde çalışmak zorunda kaldım. 1905 yılında ikisi kuantum evreni, diğeriyse uzay ve zaman fenomenleri üzerine olan üç çalışma yayımladım. Adı geçen son çalışmam görelilik kuramının temelini oluşturuyordu.

İlk çalışmamda ışığın dalga kuramını Newton'a ait parçacık kuramıyla birleştirmeyi teklif ettim; bunun için ışığı fotonlardan müteşekkil bir ışın olarak yorumlamam gerekti. Fotoelektrik etkiyi bu şekilde açıklayabiliyordum. Bu makalem günümüzde kuantum kuramının ilk önemli çalışması olarak görülse de bunun doğruluğundan kuşkuluyum. Ama en nihayetinde bu çalışma bana bir Nobel Ödülü kazandırdı.

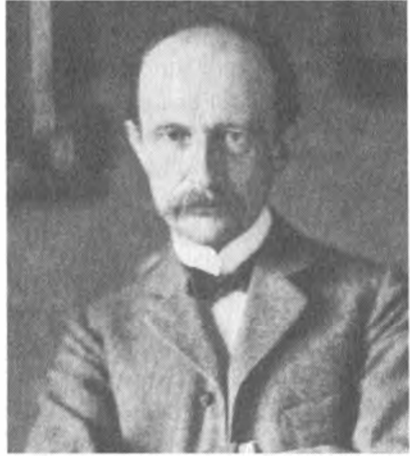
Zürih Üniversitesi'nde profesörlüğümü aldıktan sonra Prag'da ders verdim ve sonunda ETH Zürih'e gittim. Burada geçirdiğim iki kısa yılın ardından Berlin'e geldim. 1932 yılında Almanya'yı terk edip Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne girdim. Bu noktada kuantum mekaniğinin gerçek anlamda bir çözüm olmadığı görüşümde ısrar ettiğimi eklemek istiyorum.

**HEISENBERG**: Münih'te Arnold Sommerfeld'in öğrencisi olduğumdan daha erken dönemde kuantum fizikçisi kabul edildim. Kuantum mekaniğine dair, aralarında belirsizlik ilkesinin yer aldığı yasaları bin dokuz yüz yirmili yıllarda keşfettim. Bunun ardından çekirdek fiziği ve parçacık fiziğindeki problemlerle ilgilendim. 1927'de Leipzig Üniversitesi'nden profesörlüğümü aldım. 1942'de Berlin'deki Kaiser-Wilhelm Enstitüsü'nde çalışmaya başladım.

İkinci Dünya Savaşı'nın akabinde Göttingen'deki Max Planck Enstitüsü'nün başına geçtim. Enstitü 1959 yılında, benim isteğim doğrultusunda Münih'e taşındı. Schwabing'in kuzeyinde, İngiliz Bahçesi tabir edilen alanın yakınlarında yeni bir enstitü inşa edildi. Enstitüde bana ait olan, maddenin spin kuramı üzerine yoğunlaştım ama bir sonuç alamadım. Sizden farklı olarak Sayın Einstein, kuantum mekaniğinin işin özüne inmeye yaradığı görüşündeyim.

**FEYNMAN**: Kuantum fiziğinin ayrıntılarıyla ilgilenmeye başlamam, Princeton'da John Wheeler'ın doktora öğrencisi olduğum döneme rastlar. Doktoramı verdikten sonra diğer birçok fizikçi gibi, atom bombasının geliştirilmesinde çalışmak üzere New Mexico'daki Los Alamos'a girdim. Savaşın bitmesiyle Cornell Üniversitesi'ndeki hocam Hans Bethe'ye katıldım. Burada, sorunları çözmek için yol entegrali gibi farklı yöntemler keşfettim, günümüzde fizikçiler için vazgeçilmez olan Feynman diyagramlarını geliştirdim. Caltech'te parçacık fiziği, özellikle de zayıf ve güçlü çekirdek etkileşimleri üzerine eğilme fırsatım oldu. Meslektaşım Murray Gell-Mann'la beraber birçok çalışma yaptık, nitekim sizinle de bu dönemde bol bol birlikte çalıştık Herr Haller. Ben de gerçek cevabın kuantum mekaniğinde gizli olduğuna inanıyorum.

**HALLER**: Çok teşekkür ederim beyler. Kuantum fiziğinin oluşturduğu devasa bilgi dağlarını zapt etmenin en kolay yönteminin, geçen yüzyılın başında kuantum fiziğini keşfeden Max Planck'la başlayan tarihsel yolu izlemek olduğu düşüncesindeyim. Albert Einstein 1905 yılında ışık parçacıkları olan fotonları işaret ederek kuantum fiziğine büyük katkıda bulundu. Werner Heisenberg yirmili yıllarda kuantum mekaniğini ilan etti. Richard P. Feynman ise İkinci Dünya Savaşı sonunda, özellikle kuantum elektrodinamiğini keşfiyle fiziğin bu dalının gelişimini önemli oranda hızlandırdı. Söze buradan başlayalım isterseniz.



Max Planck

**EINSTEIN:** İsterseniz sözü ben alayım. 1905 yılında Brown hareketi konusundaki çalışmalarım ve ışık kuantası varsayımımla kuantum fiziğine katkıda bulundum. Brown hareketi üzerinde çalışırken, parçacıklar arasında gözlemlenen küçük titreşim hareketlerini atomların çarpışması biçiminde yorumladım. Fransa'da Jean-Baptiste Perrin konuyu buradan ele aldı ve söz konusu fenomenlerin aydınlatılmasını sağladı.

Işık kuantasıysa bıçak sırtında yürüyen bir varsayımdı. Max Planck'ın hiç hoşuna gitmemişti. Ne var ki 1915 yılında Amerikalı Robert Millikan gerçekleştirdiği başarılı deneylerle, kurduğum kuramsal tabloyu teyit eden sonuçlar elde etti. 1921 yılında bu çalışmamla Nobel Ödülü aldım. Ama ilerleyen zamanla beraber kuramımdan kendim hoşnut kalmadım. Elbette Nobel'i severek kabul etmiştim, her ne kadar bana herhangi bir maddi faydası dokunmamış olsa da, zira tüm parayı eşim Mileva aldı. Görelilik kuramım büyük ihtimalle Nobel'le ödüllendirilmezdi zaten, Stockholm'deki komite üyelerine göre fazla kuramsaldı çünkü.

**HEISENBERG:** Yo, bence alabilirdiniz, ama çok daha sonra, kırklı yılların başında. Işık kuantası varsayımınızla kuantum kuramının babalarından biri olduğunuz bir gerçek; her ne kadar sizin de ifade ettiğiniz üzere bu kuram ileride hiçbir işinize yaramasa ya da kısıtlı olarak kullansanız da. Dünyaya bir çocuk getirdiniz, ardından onu

ortada bıraktınız. Kötü bir baba olduğunuzu itiraf edin, Herr Einstein. Sonra bizler, yani ben, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger ve özellikle de Arnold Sommerfeld çocuğunuzu evlat edindik.

**EINSTEIN:** Maalesef haklısınız, iyi bir baba olamadım, ama bana soracak olursanız kuantum fiziği bir guguk kuşunun yavrusuna benziyor. Bu tuhaf fizik hâlâ tüm ayrıntılarıyla anlaşılmış değil.

**FEYNMAN:** Sanırım kuantum kuramını kimsenin anlamadığını söylemekte bir beis yok. Nitekim ben de anlamıyorum, Sayın Heisenberg de, hele siz Herr Einstein, hiç.

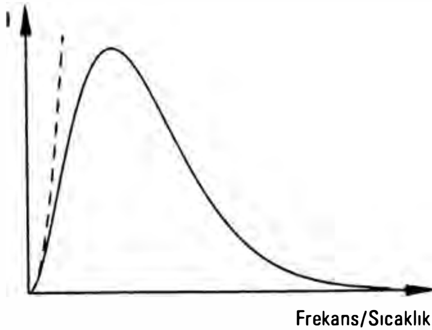
**EINSTEIN:** Zaten anlamak gibi bir niyetim de yok. Dediğim gibi işin özünün bu olmadığını düşünüyorum. Biri kalkıp da bu kuramı anladığını iddia ediyorsa, yalan söylüyordur.

**NEWTON:** Herr Einstein, lütfen kuantum kuramını daha fazla eleştirmeyin. Anladığım kadarıyla bugün bile fiziğin bilinmeyen kıtası kabul edilen bir alan bu. Belki konunun acemisi olarak ben bile bir katkı sağlayabilirim. Öyle ya, kuramı kimse gerçek anlamda anlamıyorsa bu pek de âlâ bir şey, zira benim de bir şansım var demektir. Her şeyden önce ışık kuantasıyla ilgili bir sorum olacak. Işığın parçacıklardan meydana geldiğini ileri süreli epey zaman oldu. Bu konuda herhangi bir değişiklik oldu mu peki? Yani sizin ışık kuantası diye bahsettiğiniz şeyler, Herr Einstein, benim ışık parçacıklarıma mı tekabül ediyor?

**EINSTEIN:** Öyle de diyebiliriz, ama bunu biraz daha açmaya ihtiyacımız var, çünkü kafanızı karıştıracak olsa da, ışık hem dalga hem de parçacıktan meydana gelmekte. Başta buna ben de çok şaşırmıştım. Işık kuantası kavramını ortaya attığımda aklıma ilk siz geldiniz Sir Newton. Arzu ederseniz önce 1905 yılında bu varsayıma nasıl ulaştığımı açıklayayım. Max Planck'ın 1900'de ortaya attığı yeni kuantum kuramıyla ilgili bir çalışmaydı. Planck ne yapmıştı? Boşluk ışıması için kuramsal bir açıklama bulmayı başarmıştı.

**NEWTON:** Boşluk ışıması da nedir?

**HEISENBERG:** İsterseniz kısaca açıklayayım. Her şey ideal bir ışık kaynağı üzerine düşünülürken, yani aslında teknik bir sorunun çözülmeye çalışılmasıyla başladı. 19. yüzyılın sonunda lider sanayi ülkelerinde, kentleri aydınlatacak iki farklı teknik rekabet halindeydi. Bunlardan biri aydınlatma için gaz kullanırken, diğerinde bu iş elektrikle




Bir kara cismin yaydığı ışımanın yoğunluğu (I). Yayılan ışığın azami yoğunluğu, artan sıcaklıkla beraber yüksek frekanslara doğru kayar. Klasik fizik bu azami eşiği açıklamakta yetersiz kalmaktadır (klasik fiziğin ileri sürdüğü grafik kesikli çizgiyle gösterilmiştir).

çözülecekti. Bu nedenle iyi bir aydınlatmanın gazla mı yoksa elektrikle mi sağlanacağı tartışılmaya başladı.

Aslında soru, ideal bir ışık kaynağının nasıl olması gerektiğiydi. Bu çerçevede fizikçiler ilginç bir keşifte bulundu. İdeal ışık kaynağı olarak, salt ışıma içeren bir boşluk hayal ettiler. Boşluk içerisindeki ışığın sadece boşluk duvarlarının sıcaklığına bağlı olduğunu, duvarların niteliği, örneğin malzemesi gibi ayrıntılarla bir ilgisi olmadığını düşünmek mümkün. Dolayısıyla ışığın hem rengi hem de yoğunluğu sadece bu sıcaklığa dayanır, boşluğu oluşturan çeperlerin ahşap, metal ya da taş olmasına değil. Böyle bir boşluğa kara cisim denir. Bu cisimden yayılan ışık, belli bir frekansta azami yoğunluğa ulaşır. Sıcaklığın artmasıyla bu azami eşik yukarı, daha yüksek frekanslara çıkar.

**NEWTON:** Tuhaf. Meselenin çok daha karmaşık olacağını düşünüyordum. Boşluk içinde ışıma epey basit bir hadiseye benziyor.

**HEISENBERG:** Evet, gerçekten de öyle. Sıcaklığa bağlı bu değişimin anlaşılması da aynı derecede basit. Denge durumundayken böyle bir cismin ışık yayma ve emme miktarı eşit olduğundan duvarların niteliği önemsizdir. Bu sebeple boşluk, yani kara cisim, diğer tüm kaynakların kıyaslanabileceği ideal bir ışık kaynağıdır. Boşlukta var olan ışıma, açılacak küçük bir delikten dışarı sızdırılmak suretiyle

ölçülebilir de. Ancak içerideki dengeyi bozmamak adına, deliğin kara cismin boyutlarına göre küçük olması gereklidir.

**NEWTON:** Yani kara cisim ışımasının sıcaklığa bağlı değişimi ölçülebiliyor, öyle mi?

**HEISENBERG:** Elbette. Ancak tam da burada ciddi sorunlarla karşılaşıldı. Işımayı etkileyen tek etmen sıcaklık olduğundan, sıcaklığa bağlı değişimin yalın bir matematik formülüyle açıklanabilmesi beklenir. Peki ama hangi formül bu?

**EINSTEIN:** İşin aslı şu: Belli bir sıcaklığa sahip bir kara cisimden sadece tek bir dalga boyunda ışık ya da daha genel bir ifadeyle elektromanyetik ışıma yayılmaz. Gelen ışıma birçok dalga boyuna sahiptir. Daha kesin söyleyecek olursak, farklı dalga boylarından meydana gelen geniş bir tayf var ve bu tayf da sadece tek bir etmene, yani sıcaklığa bağlı olabilir. Gerçekten de sıcaklıkla arasındaki ilişkinin kolayca ortaya çıkarılabilmesi gerekir.

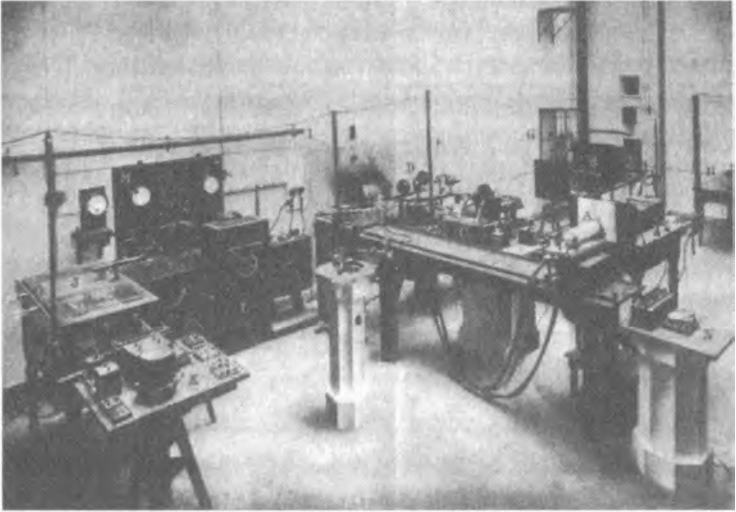
**HEISENBERG:** Alman fizikçi Gustav Kirchhoff'un, kara cisim ışıması tayfıyla sıcaklık arasında bir ilişki olduğunu anladığı 1859 yılından bu yana, cismin içindeki tayfın tanımı için bir matematik formülü aranmaktaydı.

**HALLER:** Akabinde uzun süredir kara cisim ışımasının kuramsal açıklamasıyla ilgilenen Max Planck Berlin'e davet edildi. Profesörü Philipp von Jolly'nin artık fizik eğitimi almaya değmeyeceğini söylemesine karşın Planck'ın konuya olan ilgisi azalmadı. Von Jolly'ye göre fizik alanında önemli olan her şey zaten keşfedilmişti – bugün dönüp bakıldığında tuhaf bir açıklama elbette.

Nitekim Max Planck, buraya çok yakın olan Kupfergraben No. 7 adresinde bulunan Physikalische Gesellschaft zu Berlin'de 14 Aralık 1900 günü bir sunum yaptı. Bu tarih kuantum fiziğinin doğum ânı kabul edilir. Yüzüncü yıldönümünde de, Kupfergraben'e çok yakın olan Gendarmenmarkt'a bakan devasa konser salonunda bir kutlama yapmıştık hatta.

**NEWTON:** Planck son derece değerli bir katkı sağlamış olmalı.

**EINSTEIN:** Gerçekten de öyle, onun katkısı 20. yüzyılda fiziği kökten etkiledi. Ama Planck kendi işini kolaylaştırmadı. Kara cisim ışımasını anlamak için yıllarca ışığın dalga kuramıyla ilgilendi ve herhangi bir çözüm bulamadı. Sonunda çaresizliği onu fazlasıyla cesur



Planck'ın kuantum varsayımlarını teyit eden deneylerin yürütüldüğü, Berlin'deki Physikalisch-Technische Hochschule'nin ışıma laboratuvarı.

bir varsayım yapmaya itti. Işığın, cismin cidarından dalga olarak değil, belli bir enerjiye sahip küçük kuantumlar halinde yansıdığını ileri sürdü. Bu enerji de ışığın frekansı ve Planck'ın o dönem fiziğe kazandırdığı ve haklı olarak kendi adıyla anılıp $h$ harfiyle gösterilen Planck etki kuantumu tarafından belirleniyordu. Bu sabit gerçekten de bir etki kuantumu, yani enerji çarpı zamandır. Böylece ışığın frekansıyla kuantumun çarpımı sonucu enerji elde edilir, çünkü frekansın ölçüm birimi 1/zamandır.

Bu sabit günümüzde kuantum kuramının temelini meydana getirir. $h$'nin halihazırda bilindiği kadarıyla tam değeri $h = 6{,}62608$ $10^{-34}$ Js'dir. 1 Js, yani jul çarpı saniye, 1 jullük enerjinin 1 saniye boyunca uyguladığı etkidir. Js yerine 1 kg $m^2$/s de yazılabilirdi. $h$'nin kullanılmasıyla fizikte en küçük etkinin varlığı kabul edilmiş oldu. Tıpkı Bavyera'da bir bira bahçesine oturduğunuzda orada da belli bir asgari bira miktarının olması gibi – ki bira için bu bir ölçü, yani bir litredir. Bu kadar içmek istemeyenlerin seçme hakkı yoktur. Arzu ederse içemediği birayı bardağında bırakabilir ama bir ölçü biranın parasının ödemek zorundadır. Bir litreden az bira olmaz.

*h* sabitinin kullanıma girmesiyle Planck, Kirchhoff'tan bu yana aranan kara cisim ışıması yasasını geliştirmeyi başardı. Elde ettiği formül son derece basitti. Kurduğu yasanın gözlemleri tutarlı bir şekilde tarif ettiği kısa sürede anlaşıldı. Kuantumun enerjisi, $\nu$ frekans olmak üzere $E = h \cdot \nu$ denklemiyle bulunabiliyordu. Ben de ışık kuantası kuramı için bu denklemi kullandım.

**NEWTON:** Öyleyse bu tuhaf *h* değeri, doğa sabitlerinden biri, öyle mi?

**HALLER:** Elbette, hem de en önemlilerinden biri, hatta belki de kütleçekim sabitinden bile önemli. Sabitin oldukça küçük olduğunu söylemek gerek. Ne kadar küçük olduğunu şu örnekle görebiliriz: Normal bir ampulü ele alalım. Bu ampul saniyede yaklaşık 300 trilyon foton yayar, çünkü fotonun enerjisi Planck sabitiyle orantılıdır.

Astrofizikçilerin yaptığı sayısız gözleme dayanarak, *h* değerinin evrenin her yerinde aynı olduğunu söyleyebiliriz. Uzak galaksilerde de *h* sabiti dünyamızdakiyle aynı. Milyarlarca yıl öncesi için de aynı şey geçerli. Parçacık fizikçileri artık *h*'yi bir değer almaktansa, yerine doğrudan 1 koyuyor.

**EINSTEIN:** Dediğim gibi, Planck ortaya attığı bu varsayımla kara cisim ışımasının matematiksel formülünü buldu. Olanları birlikte deney yürüttüğü meslektaşlarına anlattı ve onlar da Planck formülünün kara cisim ışımasını eksiksiz tanımladığını gördüler. Kuşkusuz kuantum fiziği için büyük bir başarı. Konuyla ilgili ilk ölçümleri deneysel fizikçi Heinrich Rubens, daha Planck'ın sunum yaptığı günün gecesinde yürüttü ve formülün işe yaradığını teyit etti.

**HEISENBERG:** Ama kuantum varsayımının Berlinli fizikçilerin sadece bir kısmı tarafından ciddiye alındığını da söylemek gerek. O dönem fizikçilerin çoğu konuyu görmezden geldi, sadece siz, Herr Einstein, o dönemde Bern'de bulunsanız da varsayımı ciddiyetle karşıladınız.

**EINSTEIN:** Evet, konu benim için son derece açıktı. Işıma birçok kuanta halinde gerçekleşiyorsa, ışık ile madde arasındaki ilişki de bir parçacık süreciyle açıklanabilmeliydi. 1904 yılında bu konunun peşine düşmüştüm, ertesi yıl da bu konuyla ilgili makalemi yayımlattım.

**HALLER:** Dolayısıyla artık sizinle, yani foton kuramıyla ilgili olarak kuantum kuramının gelişimine gelebiliriz, Herr Einstein. Önce elimizdeki olgulara bakalım: Heidelbergli fizikçi Philipp Lenard fotoelektrik etkiyi tüm ayrıntılarıyla incelemeye almıştı. Işığa maruz bı-

rakıldığında belli metal yüzeylerden elektronların koptuğu anlaşıldı. Işık daha yoğun olduğunda, örneğin ışık kaynağı metale daha yakın durduğunda elektronların daha yüksek enerjiye maruz kalacaklarını düşünmek mantıklı olacaktı. Ama gerçek hiç de böyle çıkmadı. Elektronların hızı sadece ışığın frekansına bağlıydı, şiddetine değil. Yayılan, yani metalden kopan elektronların sayısı ışık şiddetiyle orantılıydı, ama enerjileri salt frekansa bağlıydı.

**EINSTEIN:** Evet. Gençliğin de verdiği geniş yüreklilikle ışığın, Planck'ın varsayımına dayanarak, küçük parçacıklardan meydana geldiğini, bunların enerjisinin de, $v$'nin frekansı ifade ettiği $hv$ çarpımına eşit olduğunu kabul ettim. Bu sayede Lenard'ın yaptığı gözlemi açıklamak da son derece kolay olmuştu. Yoğun ışık, metalden yayılan foton sayısının daha çok olması anlamına geliyordu, ancak fotonların enerjisi aynıydı. Fotonların enerjisinin neden ışığın frekansına bağlı olduğu da açıklanabiliyordu, zira tek seçenek buydu.

Geliştirdiğim fotoelektrik etki kuramı, Planck'ın fikirlerinin uygulaması olarak görülebilir. Ne var ki Max Planck böyle düşünmüyordu. Hatta bir defasında açıkça benim foton kuramımı reddettiği vakidir, ki bunun sebebini hiçbir zaman anlayamamışımdır. Gerçekten de çok tuhaftı – Planck hem kuantum kuramını geliştiriyor, hem de benim foton kuramıma karşı çıkıyor. Neden böyle davrandığını anlamasam da, kendisiyle bu konuyu konuşmaktan daima kaçındım.

**HALLER:** Doktorasını Münih'te, Arnold Sommerfeld'in yanında yapmış olan Amerikalı fizikçi Hans Bethe bir defasında şöyle demişti: Kuantum kuramını gerçekten anlayan ilk kişi Einstein'dır, Max Planck değil! Sanırım Bethe haklıydı. Kuantum kuramını ciddiye alan ilk kişi siz olsanız da, sonrasında bu kurama karşı büyük bir şüphe beslediniz. Önce büyük bir devrimci, ardındansa kuşkucu rolünü üstlendiniz.

**NEWTON:** Kuşku meselesini bir yana bırakıp kuantum süreçlerine dönelim lütfen, daha doğrusu sizin bahsettiğiniz sürece. Eğer bunu bir çarpma süreci olarak hayal edersem, elektronların enerjisi, metal levhaya düşen ve buradan yansıyan ışığın arasındaki açıya bağlı olmalı.

**EINSTEIN:** Haklısınız. Bu açı ne kadar genişse, elektronların enerjisi aynı oranda büyüktür. Robert Millikan, kesin bir ölçüm elde etmeyi başararak ışık kuantası varsayımımın doğruluğunu bir kez daha teyit etti. Yine de bu mesele kafamı kurcalamaya devam ediyordu. Varsa-

yıma göre ışık ışını çok sayıda fotondan meydana gelen bir akımdı. Öte yandan ışık bir dalga fenomenidir. Dalgalar salınır, peki ama bir foton akımı nasıl salınacaktı? Buna verecek bir cevabım yoktu. Fotonlar metal bir levhaya isabet ettiğinde birer elektron salıveriliyordu. Bu anlık bir süreçti ve ne zaman gerçekleşeceğini önceden kestirmek mümkün değildi. Etki kuantumunun varlığı sebebiyle dünya artık kesintisiz değil, ölçülü aralıklarla, yani kuantumlarla hareket ediyordu. Bu çözüm içime sinmemişti, Planck'ın da öyle. Sanırım bu sorunla daha çok boğuşmamız gerekecek.

Nedensellikle ilgili de aklıma takılan şeyler var. Nedensellik dünya görüşümüz ve gündelik yaşamımızın ayrılmaz bir parçası, düşünürken daima sebep ve sonuç kategorilerini kullanıyoruz. Normal insan aklına göre hiçbir şey sebepsiz olamaz. Planck etki kuantumuysa, nedenselliğe dayalı dünya görüşümüz için aşılması olanaksız bir engel teşkil ediyor.

**HALLER:** Herr Einstein, sanırım yavaş yavaş felsefenin alanına kayıyorsunuz. Arzu ederseniz tartışmaya bu noktada ara verelim. Öğle yemeği için Gendarmenmarkt yakınındaki Churrasco et restoranına gitmeyi öneriyorum.

On dakika sonra beş fizikçi restorandaki masalarına yerleşmişti bile. Einstein meslektaşlarıyla yirmili yılların Berlin'i hakkında derin bir sohbete dalmış, Heisenberg ise burada geçirdiği otuzlu yılları diline dolamıştı.

Öğleden sonra yeni bir tartışmaya başlamadılar. Birlikte Unter den Linden Bulvarı'nda küçük bir yürüyüşe çıkıldı. Kısa süreliğine, Heisenberg'in yakından bildiği Akademi binasına girdiler. Sonra yolları önce Brandenburg Kapısı'na, ardından Adlon Oteli'nin güneyinde kalan Soykırım Anıtı'na düştü. Tiergarten Parkı'nda yaptıkları yürüyüşün ardından Zoo İstasyonu'na vardılar.

Burada Gedächtniskirche'yi ve Nürnberger Straße üzerindeki Europacenter'i ziyaret ettiler. Wittenbergplatz'dan bindikleri metro onları yeniden Gendarmenmarkt'a götürdü.

# 3

## Kuantum Fiziğinde Atomlar

Ertesi gün beş fizikçi sohbetlerine kaldıkları yerden devam etti.

**HEISENBERG:** Fizik cansız doğanın keşfiyle ilgilenir. Hedefiyse bu doğa içerisinde yer alan süreçleri belli deneylerle kavramak ve matematik yasalarıyla genel geçer biçimde tarif etmektir. Başta Yunanistan'dakiler olmak üzere antikçağın doğa filozofları bile fiziksel doğa fenomenlerinin tarifiyle ilgilenmişti. Fiziğin asıl tarihi çok daha geç dönemlerde başlasa da, bu önçalışmalar sonraki gelişimin önemli önkoşulları niteliğindeydi – nitekim aynısı atom kuramı için de geçerli. Maddeyi meydana getiren çok küçük, bölünmez yapıtaşları olduğu düşüncesi eski Yunanlara, yani günümüzden yaklaşık iki bin beş yüz yıl öncesine dayanmaktadır. Dolayısıyla kuantum fiziği ve atom kuramını anlamak isteyenlerin, modern fiziğin tüm yönlerinin ortaya çıkmasını sağlayan düşüncenin kökenlerini öğrenmek amacıyla atomlara dair ilk görüşlere göz atmalarında fayda vardır.

Yunan felsefesinin ilk dönemi, madde üzerine düşünmeye dayanmaktaydı. Varlık ve Oluş filozofların ilgi alanının odağını teşkil ediyordu ve bu bağlamda maddenin en küçük, bölünmez yapıtaşları fikri ortaya atıldı. Miladi takvimin başlamasından önce 6. yüzyılda yaşamış olan Thales, dünyayı oluşturduğunu ileri sürdüğü yeknesak bir temel maddeden söz eden ilk kişi oldu.

Yaklaşık yüz yıl kadar sonra tanım biraz daha somutlaşmaya başladı. Filozof Anaksagoras çok sayıda temel madde olduğunu ve dünyanın çeşitliliğini de bunların karışımının meydana getirdiğini ileri

sürdü. Aslına bakılırsa bu o kadar da kötü bir fikir değildi, zira günümüzde yaklaşık yüz tanesini bildiğimiz kimyasal elementler var ve dünyanın çeşitliliği de bu elementlerin karışımından oluşuyor.

Ardından filozof Empedokles konuyu biraz daha somutlaştırdı ve sadece dört temel element olduğunu ilan etti: toprak, su, hava ve ateş. Peki ama ateş nasıl bir temel element olabilirdi? Ben şahsen her zaman bunu biraz saçma bulmuşumdur. Sonunda Leukippos ve Demokritos sayesinde maddeciliğe yönelim başladı. Bunlardan Demokritos atom kavramını, yani maddeyi oluşturan en küçük bölünmez parçaları tedavüle soktu. Nitekim atom sözcüğü, Yunanca bölünmez anlamındaki *atomos*'tan gelir.

Boşluk kavramıysa ilk olarak Leukippos tarafından ortaya atıldı. Ona göre atomlar bu boşluğun içerisine yerleşmişti. Boş hacim artık önemli bir işleve sahipti: geometrinin taşıyıcılığı. Demek ki atomlar boş hacim içinde hareket ediyor. Bu önemli bilginin öncesinde boşluk kavramı yoktu. Hacim pratik anlamda maddeyle eşdeğerdi. Dolayısıyla antik Yunanlılar boşluğu ve böylelikle geometriyi keşfettiler.

Gerçi Leukippos'a göre atomlar belli bir biçime sahipti ve belli hareketler gerçekleştiriyordu ama bunlar dışında başkaca özellikleri yoktu. Demokritos atomun rengi ve kokusu olmadığını varsayıyordu. Bu nitelikler atomların farklı dizilim ve hareketleriyle meydana geliyordu. Bu da önemli bir bilgiydi. Demokritos buradan yola çıkarak şöyle akıl yürüttü: "Bir şey ancak görünürde renklidir, görünürde tatlı ya da acıdır. Gerçekte sadece atomlar ve boş hacim vardır." Oldukça iyi bir açıklama. Günümüzde bunun doğru olduğunu biliyoruz.

Platon'un büyük diyalogu *Timaios*'ta atomları düzenli geometrik biçimlerle ilintilendirdiğinden haberdarız. Toprak, su, hava ve ateş elementleri, burada küp, dörtyüzlü, sekizyüzlü, yirmiyüzlü gibi düzenli geometrik biçimlerle karşılaştırılıyor. Her zaman hayran kaldığım bir şey. Bu yolla geometrik kavramlar atomlar için önemli hale geldi. Modern atom fiziğinin gerçekten de geometriyle de alakalı olduğunu göreceğiz. Atomların dalga fonksiyonu basit geometrik biçimlerden oluşur.

İşin ilginç yanı birçok kültürde atom kavramının hiç ortaya çıkmamış olması. Sadece eski Yunanlılar bu konu üzerine eğilmişti. An-

cak onlar da herhangi bir deney yapmayı düşünmemiş, salt düşünce yoluyla doğa hakkında daha fazla bilgi edinmeyi hedeflemişlerdi. Ama başarılı olamadılar, zira henüz madde hakkında bilgi kısıtlıydı. Genel itibariyle de Yunanlıların deney konusundaki çekingenliklerinin önemli bir dezavantaj olduğu ortaya çıktı. Onlar felsefeciydi, bildiğimiz anlamda doğabilimci değil.

**HALLER**: Antikçağın atom öğretisi hakkındaki birçok ayrıntıyı, İtalya' da yaşanan bir tesadüfe borçluyuz aslında. 1417 yılında Romalı şair ve felsefeci Lucretius'un altı ayaklı mısralarla kaleme aldığı ve Leukippos ile Demokritos'un fikirlerini sadece aktarmakla yetinmeyip bunları geliştirdiği *Evrenin Yapısı* başlıklı elyazması bulundu. Lucretius'un eserinde eskiçağ atomculuğu altın dönemini yaşıyordu. Bu elyazması, matbaanın keşfinin ardından Avrupa'da en geniş yankıyı uyandıran ve birçok düşünürü etkileyen kitaplardan biri oldu.

Lucretius modern fiziğin temel yapıtaşlarını şaşırtıcı bir netlikle yazıya dökmeyi başarmıştı ve eserinde, Aristoteles ile Platon'un idealist düşünce sistemleri karşısında varlığını sürdürememiş olan antik atom öğretisine dair ayrıntılı tanımlara rastlamak, doğanın aydınlatılması ve mitos konumundan çıkarılmasını vurgulayan, daima sorgulayıcı doğabilimleri anlayışıyla doğa ve doğa yasaları karşısında duyulan büyük saygının bir karışımını bulmak mümkün.

**HEISENBERG**: Yunanlıları Romalılar izledi ve Yunan düşüncesinin bir kısmını sahiplendiler. Roma İmparatorluğu'nun yıkılmasının ardından Batı dünyası bin yıldan uzun süre dini fanatizm ve batıl itikatların baskın olduğu entelektüel bir çöküş dönemi yaşadı.

İtalya'da Rönesans'ın başlamasıyla Avrupa'nın geniş kesimlerinde, Yunan düşüncesinin aydınlatıcı parlaklığı, bin yıl önce yitirdiği anlamını yeniden buldu. Kopernik, Leonardo da Vinci, Johannes Kepler, Galileo Galilei ve elbette Sir Isaac Newton gibi bilim dehalarının öncülüğünde modern doğabilimleri çağı başlamış oldu.

On yedinci yüzyıla gelindiğinde, antikçağ felsefecilerinin ortaya atmış olduğu atomculuk, ilk kez somut doğabilimiyle ilintilendirildi. Bu dönemde doğabilimciler hidrojen, oksijen ya da bakır gibi kimyasal elementlerin benzer atomlardan meydana geldiği sonucuna vardı. Siz, Sayın Newton, daha da ileri gidip maddelerin bir arada durmasının, örneğin bir metalin sertliğinin atomlar arasındaki

kuvvetlerle ilgisi olduğu görüşünü savundunuz. Bu çok iyi bir düşünceydi, zira aradan uzun zaman geçtikten sonra bunun gerçekten de böyle olduğu ortaya çıktı.

Fransa'da Antoine Lavoisier, İngiltere'deyse John Dalton 18. yüzyılda bu konuda büyük katkılar sağladı. Kimyasal tepkimeler esnasında nicelik oranları da ilk kez bu dönemde ölçülmeye başladı. Örneğin hidrojen ve oksijenin birleşimiyle suyun oluşması esnasında bir oksijen atomunun iki hidrojen atomuyla birleştiği ortaya kondu. Ardından elektrik akımından sorumlu atomların bulunmasıyla elektron fikri ortaya atıldı. Özellikle atom çekirdeklerinin yanı sıra elektronların da atomun birer parçası olmaları gerektiği keşfi önemliydi. Ne var ki o zamanlar atomun yapısı hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek imkânsızdı. Bu fırsat 20. yüzyıla nasip oldu.

**NEWTON:** Atomların boyutları hakkında ne zaman bilgi sahibi olundu?

**HEISENBERG:** Ancak 1865 yılında Josef Loschmidt'in, kendi adıyla anılan ve maddenin makroskobik boyutta bir ölçü birimi olan mol başına içerdiği atom miktarını belirten $L = 6{,}024 \cdot 10^{-23}$ değerini ortaya atmasıyla. Nitekim bu sayı 32 gram oksijen gazının içindeki atom sayısına tekabül ediyor. Bu sayede bir atomun yaklaşık büyüklüğü ($10^{-10}$ metrelik yarıçapı) ve kütlesi hakkında bir şey söylemek mümkün oldu. Hidrojen atomu için yaklaşık $1{,}7 \cdot 10^{-24}$ gramlık bir kütle bulundu. Yani atomlar sadece çok küçük olmakla kalmıyorlardı; aynı zamanda çok da hafiftiler. Öyle ki tek bir atom tartılamazdı.

**FEYNMAN:** Tayf çizgilerinin keşfi fizik tarihinde önemli bir adımdı. Joseph von Fraunhofer daha 19. yüzyılın başında Münih'te, güneş ışığında keşfettiği bu çizgileri ayrıntılı olarak incelemeye başlamıştı. Ancak bunların varlığını açıklamayı başaramadı. Açıklama daha sonra kuantum mekaniği tarafından getirilecekti. Belli bazı maddelerin belli çizgiler, yani özgül frekansa sahip ışıklar ürettiği anlaşıldı. Tayf analizi yönteminin keşfi sonucu kimyayla fizik hiç olmadığı kadar birbirine yaklaştı.

Atom fiziğinin gelişiminde önemli olan bir sonraki adımsa Hollandalı fizikçi Pieter Zeeman'ın yeni keşfiyle atıldı. Zeeman güçlü bir manyetik alanın içinde bulunan atomların tayf çizgilerini inceledi ve bunların yayılım gösterdiğini keşfetti. Yaptığı hassas ölçümlerle tayf çizgilerinin yarılıp birçok bileşene ayrıldığını ortaya koy-

du. Bu yarılmayı günümüzde Zeeman etkisi adıyla biliyoruz.

Zeeman'ın hocası Hendrik Antoon Lorentz bu bölünmeyi, atomun içinde ışık yayan elektrik yüklü parçacıklar olduğunun bir kanıtı olarak yorumladı. Manyetik alanda bu parçalara, tayf çizgilerinin yarılmasına sebep olan bir kuvvet etki eder. Lorentz ile Zeeman, bu etki altında gerçekleşen frekans değişikliklerine dayanarak parçacığın yüküyle kütlesi arasındaki ilişkiyi bile tespit edebiliyordu. Parçacıkları eksi yüklüydü. Kütleleriyse hidrojen atomunun sahip olduğu kütlenin yaklaşık iki binde birine eşitti.

Atom fiziği açısından önemli bir başka adımsa elektronun 1897 yılındaki keşfiydi. Başta Alman Emil Wiechert ve Walter Kaufmann'ın yanı sıra İngiliz Joseph John Thomson olmak üzere birçok fizikçi elektronun keşfi üzerinde çalışmaktaydı. Thomson Londra' daki Royal Institution'da katot ışınlarıyla gerçekleştirdiği deneyinin sonuçlarını 30 Nisan 1897'de açıkladı. Nitekim bu tarih elektronun doğum ânı olarak anılmanın yanı sıra atom fiziğinin de başlangıcı kabul edilebilir.

Walter Kaufmann ve ondan önce Wiechert de katot ışınlarıyla deney yapmış ve Thomson'dan daha iyi sonuçlar elde etmişlerdi; ne var ki Kaufmann, Thomson'ın yaptığı gibi yeni bir parçacıktan bahsetmemişti. En büyük hatası da bu oldu, aksi halde elektronu keşfeden kişi olarak onun adını anacaktık.

Fizik alanındaki bir sonraki gelişmeyi Ernest Rutherford adında bir Yeni Zelandalıya borçluyuz. Rutherford yüzyılın başında İngiltere'de, ancak Cambridge'de değil Manchester'da çalışıyordu. Asistanları, yaptıkları deneyde ince bir altın folyoya alfa parçacıkları gönderdi. Bu esnada parçacıkların folyoyu dik ya da dike çok yakın bir açıyla geçtiğini fark ettiler. Ancak alfa parçacıkları ara sıra, sanki folyonun bir atomuna çarpıp sekiyormuşçasına ciddi bir sapma gösteriyordu.

Rutherford çok şaşırmıştı. 1911 yılında doğru açıklamayı buldu. Atomun sadece küçük bir parçasının direnç göstermesi tüm kütlenin de bu küçük parçacıkta olduğunun işaretiydi. Rutherford kütle sahibi parçanın boyutlarını tespit etmeyi başardı ve bunun, atomun büyüklüğüne kıyasla çok küçük olduğunu gördü. Pozitif yüklü alfa parçacıklarının gösterdiği sapmanın da elektrik kuvvetlerinden, yani çekirdeğin pozitif yüklü olmasından kaynaklandığını buldu. Böyle-



Atomların iç yapısını keşfeden Ernest Rutherford.

likle atom çekirdeğinin pozitif yüke sahip olduğu keşfedilmiş oldu.

Rutherford bu bilgiye dayanarak kendi adıyla anılan atom modelini geliştirdi. Buna göre atom minik bir gezegen sistemini andırıyordu. Atom, kütlesinin neredeyse tamamını oluşturan pozitif yüklü bir çekirdekten meydana gelmekteydi. Çekirdeğin pozitif yükü, nispeten uzak yörüngelerde dolanan elektronlar tarafından dengelenmekteydi. Elektron sayısı, atomun dışsal özelliklerini, özellikle de kimyasal davranışını belirleyen kıstas olması nedeniyle son derece önemliydi.

Atomun oranları da bu dönemde anlaşıldı. Atomu 10 metre çapında küre olarak hayal edecek olursak, çekirdek yaklaşık 1 mm çapında bir toz zerresi kadar yer kaplar. Atomun geneli tamamen boş sayılabilir, çünkü kütlesinin neredeyse tamamı çekirdekte yoğunlaşmıştır.

Hidrojen, tek elektron ve çekirdekten meydana gelen en basit atomdur. Araştırmalar sonucunda hidrojen atomunun çekirdeğinin tek bir protondan meydana geldiği ortaya çıktı. Bir sonraki atom olan helyumun çekirdek yükü 2'dir ve kabuğunda iki elektron barındırır. 92 elektron ve çekirdeğinde 92 proton bulunan uranyum gibi ağır atomlara kadar bu dizi böyle devam eder.

**HEISENBERG:** Öte yandan Rutherford'un atom modelinin sorunlu yanları da var. Atom çekirdeği etrafında dolanan bir elektron, bunu ancak kısa süreliğine yapabilmelidir, çünkü elektronlar bir tür titreşim hareketi gerçekleştirir ve titreşen sistemlerin elektromanyetik dalgalar yaydığını biliyoruz. Bu esnada ihtiyaç duyulan enerji elektronun hareket enerjisinden karşılanacak, dolayısıyla elektron enerjisini kaybedip kısa sürede çekirdeğe düşecektir. Ama bunun böyle olmadığını biliyoruz. Sebebinin ne olabileceği, o dönemlerde kimsenin cevap veremediği zor bir soruydu.

Tüm atomların aynı yapıya sahip olmaları da dikkat çekici. Neden her hidrojen atomu, bir başka "türdeşine" tıpatıp benziyor? Klasik fizik bu duruma bir cevap bulamadı. Ama doğada rastladığımız ikiliği, yani çeşitlilik ve kararlılığı tam da atomların bu özelliği açıklıyor. Yine cevapsız bir noktaya gelinip tıkanılmıştı. Klasik fiziğin yasaları uyarınca bu durumu anlamak o zamanlar mümkün değildi, zira bu yasalar iç ölçek kullanmaz. Bir elektronun çekirdekten santimetrenin milyonda biri, binde biri ya da bin katı mesafede olup olmamasının hiçbir önemi yoktur. Peki öyleyse nasıl oluyor da hidrojen atomundaki elektron, hızını, çekirdeğe olan mesafesi daima $10^{-8}$ santimetre olacak şekilde ayarlıyor?

Bohr problemi kendine has bir yöntemle çözdü. Elektronların sadece belli yörüngelerde dolanabilecekleri varsayımından yola çıktı; bu esnada yörüngelerinde enerji kaybetmemeleri gerekiyordu. Sebebini bilmiyordu – sadece öyle olduğunu varsaydı. Henüz geçerli bir açıklama değildi, ancak ilginç bir fikirdi ve buradaki sohbetimiz esnasında bu sayede birçok şeyi açıklayabildiğini yakında göreceğiz. Kuantum fiziğinin gelişimi açısından bir başka ilginç olay da, James Franck ve Gustav Hertz'in deneyleriydi. İki bilimadamı atom ve moleküllerde bulunan elektronların sadece belli, kati enerji değerlerine sahip olduğunu kanıtladı.

Atom fiziğinin sorunlarının çözülmesi, Max Born, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger ve bendeniz tarafından kurulmuş olan ve mikro düzeydeki fiziğin fenomenlerini niceliksel açıdan tarif edebilen kuantum mekaniği sayesinde gerçekleşti.

Atom ya da atomaltı parçacıkların dünyasında normal mekaniğin kuralları geçerliliğini yitirir. Max Planck kuantum kuramına dair ilk fikirleri 1900 yılında geliştirmiş olsa da bu fikirlerin beraberinde ge-

tirdiği sonuçların anlaşılması için, özellikle Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Erwin Schrödinger, Max Born, Wolfgang Pauli, Paul Dirac ve benim çalışmalarımızla dolu yirmi yıl geçmesi gerekti.

**FEYNMAN**: Kuantum kuramının mikrofiziği açıklamakta neden bu kadar başarılı olduğu halen gizemini korumakta. Zaten ben de bu yüzden "Kuantum kuramını kimse anlamıyor" dedim. Kuramın kurucularından olan Niels Bohr'un, o esnada başı dönmeyenin kuantum kuramını anlamamış olduğunu ileri sürmesi de bundan.

**HEISENBERG**: Evet, doğru, ama Bohr bu durumla yaşamasını becerebiliyordu. Hatta daha da ileri gidip, nasıl ki bazı insanların alkole ihtiyacı varsa, onun da bu belirsizliğe ihtiyaç duyduğunu söyleyeceğim. Bu tutumu kişiliğinin bir parçasıydı, aksi halde kendisi olamazdı. Mr. Feynman, siz de kuantum kuramıyla böbürlenmeyi seviyorsunuz. Kimse kuantum kuramını anlamıyor derken, elbette sizin dışınızda herkesi kastediyordunuz. Öte yandan böyle bir şeyi benim yanımda hiç dile getirmediniz. Herhalde kuramı gayet iyi, neredeyse sizin kadar iyi anladığımı düşündüğünüzden olsa gerek.

**FEYNMAN**: Abartıyorsunuz Herr Heisenberg. Kuantum fiziğini benden daha iyi anladığınıza şüphem yok. Nihayetinde kuramı bulan sizsiniz, ben değil.

**EINSTEIN**: Niels Bohr'a dönelim. Max Planck osilatörlerinin daima tamsayılı değerlerle temsil edilen belli enerji seviyelerinde olduklarını varsaymıştı. Bohr ise klasik mekaniğin atom düzeyinde geçerliliğini yitirdiğini, atomların daha ziyade kesin tanımlanmış enerji seviyeleriyle karakterize edildiğini varsaydı. Yani hidrojen atomunun elektronu, sadece sabit yörünge olarak adlandırılan belli çemberler üzerinde bulunabilirdi. Oysa klasik mekanik sayısız yörüngeye izin veriyordu. Yeni mekaniğe göre bu mümkün değil artık. Bir elektron sabit bir yörüngede bulunurken enerji yaymaz. Enerji ancak elektronun bir yörüngeden, enerji seviyesi daha düşük bir başkasına sıçramasıyla açığa çıkar. İlk yörüngesinde enerjisi E(1), ikincisinde E(2) ise, E(1) – E(2) arasındaki fark bir ışık kuantası olarak açığa çıkar. Bohr bu varsayıma, öncesinde herhangi bir açıklama bulmadan varmıştı.

**NEWTON**: Peki Bohr bu tuhaf fikre nasıl kapıldı? Öne sürdüğü varsayım bilinen doğa yasalarıyla, özeldeyse benim mekaniğimle uyumlu değil.



Arnold Sommerfeld ve Niels Bohr.

**HEISENBERG:** Öncelikle hayal gücü sayesinde. Varsayımının sizin mekaniğinizle tutarlı olmaması umurunda bile değildi diyelim. Anlaşılan mekaniğiniz hakkında ayrıntılı bilgisi de yoktu. Atom ölçeğine inildiğinde doğa yasalarının değişmesi gerekeceğine inanıyordu. Aslında gerçek anlamda bir model geliştirmekten çok, gözlemlediklerini taşıyabilecek bir model oluşturdu ve 1913 yılında Bohr atom modeli olarak fizik dünyasına tanıttı. Sadece bir modeldi bu, bir kuram değil.

Elektronun açısal momentumu olan (yarıçap x moment), diğer bir deyişle (yarıçap x kütle x hız), (gram x santimetre x santimetre x saniye) birimiyle gösterilir. Bu etki büyüklüğü, yani (enerji x zaman)'dır. Bohr bunun ardından açısal momentumun –yine bir etkiye tekabül eden elektronun tam yörünge turuyla birleştirildiğinde– etki kuantumu *h*'nin katlarına karşılık geldiğini varsaydı: 2 x *h* ya da 3 x *h* gibi.

Ardından Planck tarafından teklif edilen süreksizlik haline vurgu yaptı ve atomların sadece belli hallerde var olabileceklerini ileri sürdü. Bu hallerdeyken ışımıyorlardı. Bohr atomların neden ışımadığını anlamıyordu – sadece varsaymakla yetinmişti. Nitekim bu hipotez atomların neden kararlı olduklarını açıklıyor. Buna rağmen

atom kabuğunun yapısını meydana getiren doğa yasaları hakkında ayrıntılı bilgi edinmek için uzun bir yolun kat edilmesi gerekiyordu. Öte yandan Bohr'un şansı yaver de gitmişti. Hidrojen görece basit bir atomdur; Bohr'un, getirdiği ölçülü aralık, yani kuantumlama yardımıyla hidrojen atomunun enerji seviyelerini son derece kesin biçimde tarif edebildiği ortaya çıktı. Buna ilave olarak, temel halde bulunan hidrojen atomundaki elektronun açısal momentumu olmadığı, yani Newton mekaniğiyle çeliştiği anlaşıldı.

**NEWTON:** Enerjiye bir bakalım öyleyse. Basit bir yörünge için denklemimiz, (açısal momentum x $2\pi$) eşittir ($h$ x n)'dir; elbette burada n, yanılmıyorsam ana kuantum sayısı olarak adlandırılan bir tamsayıdır. Böylelikle enerji için bir evrensel sabit elde etmiş olur ve $1/n^2$ ile çarparız. Oldukça yalın bir ilişki var.

**HALLER:** Evet, bunun akabinde de enerji farkları, $m$ ve $n$'nin tamsayı olması koşuluyla bu sabitle çarpılarak $(1/m^2 - 1/n^2)$ elde edilebilir. Herhangi bir m sayısı söz konusu olduğunda, n, m+1'den başlayıp sonsuza gider. Bu sabite Rydberg sabiti adı verilir ve günümüzde lazer fizikçileri tarafından tam değeri 10973731,568525 $m^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Enerji seviyeleri, m sayısına bağlı seriler oluşturur. Daha 1885 yılında İsviçreli Jakob Balmer, hidrojen atomunun, $(1/4 - 1/n^2)$ ile çarpılan bir sabitle tanımlanabilecek bir dizi enerji seviyesine sahip olduğunu buldu. Bunlar Balmer serisi adıyla da anılmaktadır. Burada m = 2'dir. Öte yandan m = 1 serisi, yayılan ışık morötesi tayfta kaldığından ancak çok daha sonra keşfedildi. Bu seri de $(1 - 1/n^2)$ ile ifade edilmektedir. Buradaki ilk seviye, hidrojen atomunun temel haline karşılık gelir. Seri adını, kâşifi olan Lyman'dan almıştır. Bunun ardından Paschen serisi olarak anılan m = 3 serisi $(1/9 - 1/n^2)$ ve m = 4, yani Brackett vs. serileri de bulunmakta gecikmedi.

Bohr deneysel durumun farkındaydı elbette. Basit formülünü geliştirmek için denemeler yaptı. Formülün nasıl olup da doğru çıktığına dair bir açıklaması olmamasını önemsemiyordu. Bu açıklama daha sonra, yirmili yılların ortasında Edwin Schrödinger, Max Born ve siz Herr Heisenberg'in çalışmalarıyla geldi.

Notasyona ilişkin küçük bir not düşmek istiyorum. Hidrojenin temel hali s-halidir, ilk uyarım p, ikinci uyarım d, üçüncüsü f vb. harflerle tarif edilir.

**HEISENBERG:** Yüksek, yani n ya da m gibi büyük değerlerle yapılan uyarılmalarda enerji farklarının giderek küçüldüğünü, dolayısıyla gerçekte enerji seviyelerinin sürekliliğinin sağlandığını de belirtmek gerekir. İyi bir yaklaştırımla artık Newton mekaniğinin açıklayabileceği bir alana ulaşmış oluruz. Bu ilkeye Bohr mütekabiliyet ilkesi adı verilmiştir. Buna göre büyük kuantum sayılarında kuantum fiziğinin kuralları, sizin temsil ettiğiniz klasik fiziğe yaklaşır.

**NEWTON:** Bunu duymaktan son derece memnunum. Demek oluyor ki benim keşfettiğim mekanik, sadece büyük kuantum sayılarında da olsa kuantum fiziğine faydalı olabiliyor.

**HEISENBERG:** Evet ama öte yandan Bohr'un atom modelinin birçok ayrıntısının, özellikle elektronların dairesel değil eliptik yörüngelerde hareket ettikleri bilgisinin, Münih'teki hocam Arnold Sommerfeld tarafından ortaya atıldığını hatırlatmama izin verin. Sommerfeld atom modelinin oluşturulmasına büyük katkılar sağladı. Aslında Bohr ile beraber 1922 yılında ya da başka bir zaman Nobel Ödülü almalıydı, ama maalesef olmadı. İskandinav olması hasebiyle Bohr biraz iltimaslı muamele görmüştü.

**HALLER:** Elli yıllık sürenin ardından artık ödül dosyası açılmış durumda. Nitekim dosyaya bakıldığında Sommerfeld'in Nobel almasını engelleyenin bizzat Bohr olduğu ortaya çıkıyor. Bunu niye yaptı bilmiyoruz. Aslında Sommerfeld'le iyi arkadaştılar, yine de gizliden ona karşı çalışmıştı, zira Sommerfeld mükerrer defalar Nobel Ödülü için aday gösterilmesine karşın, Bohr her defasında bu konuyu rafa kaldırtmayı başarmıştı.

**HEISENBERG:** Bunu bilmiyordum ama şimdi her şey daha anlamlı görünmeye başladı. Bohr ile sık sık Sommerfeld hakkında konuşurduk ve ona karşı bir antipati beslediğini hissettiğimi hatırlıyorum. O zaman da tuhaf gelmişti ama Bohr böyle biriydi işte. Muhtemelen atom modelini geliştirmiş olmanın şanını kimseyle paylaşmak istemiyordu.

**EINSTEIN:** Pekâlâ, bunları bir kenara bırakalım. Bunların hepsi eski hikâyeler. Nobel Ödülü olmasa da Sommerfeld –tıpkı Niels Bohr gibi– büyük fizikçilerden biriydi. Siz Sayın Heisenberg ve Wolfgang Pauli gibi öğrencileriyle beraber kuramsal fiziğin en önemli okulunu kurdu ki, bu bile başlı başına büyük bir başarı sayılır. Bohr ve Sommerfeld'in çalışmalarının ardından, Avrupa'yı kasıp kavuran Birinci

Dünya Savaşı'nın da etkisiyle atom fiziğinde bir süre durgunluk yaşandı.

**NEWTON:** Tekrar hidrojen atomuna dönmek istiyorum. Benim anlamadığım Rutherford modelinin ciddiyetini halen koruyup korumadığı.

**HEISENBERG:** Bu hassas bir soru. Varsayalım hidrojen atomunun anlık bir görüntüsünü alıyoruz, ama normal ışık altında değil, röntgen ışınlarıyla. Bu durumda elektronun izlediği yolu görebilir miyiz?

**NEWTON:** Kuşkusuz görebiliriz. Müteakip anlık görüntüler aldığımızda da elektronun yörüngesi kendiliğinden ortaya çıkacaktır.

**HEISENBERG:** Yanılıyorsunuz Mr. Newton. Başta ben de böyle olacağını düşünsem de, kısa sürede aklım başıma geldi. Buradaki asıl sorun gözlemin, yani ölçme işleminin atomu etkilemesi, hatta kimi zaman bozunmasına bile neden olması. Bu nedenle elektronun yörüngesini saptamak mümkün değildir. Bir foton elektrona isabet ettiğinde onu saptırır. İlkesel olarak elektronun yörüngesini ölçmek mümkün değildir. Burada gözlemlenebilirliğin ve Rutherford modelinin sınırlarına dayanmış oluyoruz. Tüm bu muhakemenin sonucunda elektronların yörüngesi diye bir şey olmadığı kanaatine vardım.

**NEWTON:** Yapmayın ama Herr Heisenberg, söylediğiniz şey son derece saçma. İllaki bir yörüngeleri vardır. Ne de olsa elektron, bir an buradayken bir sonrakinde başka bir yerde. Her an için bir konumu varsa, elbette bir de yörüngesi, protonun etrafında dönerken bir de açısal momentumu olacaktır.

**HEISENBERG:** Sir Isaac, siz fena halde yanıldınız. Hidrojen atomu temel halde bulunuyorsa elektronun açısal momentumu olmaz. Bu söylediğimiz gerçi sizin mekaniğinizle çelişiyor, ama kuantum mekaniğinde zaten sizin mekaniğiniz pek işe de yaramıyor. Yerini bizzat kullanıma sunduğum belirsizlik ilkesi aldı. Aynı zaman dilimi içinde bir elektronun hem yerini hem de hızını gözlemleyemeyiz. Yer hakkında kesin bilgiye sahip olduğumuzda hızını bilemeyiz, hızını tespit ettiğimizdeyse o sırada bulunduğu yer belirsiz olur. Yerin belirsizliğiyle momentumun, yani kütle ile hızın çarpımının belirsizliği daima asgari $h$ olur ve hiçbir durumda Planck sabitinden küçük bir değer alamaz.

İki bin yıl önce Yunan filozofu Zenon, yaydan atılmış bir okun herhangi bir anda kesin olarak belirlenmiş bir yerde bulunamayaca-

ğını, aksi takdirde uçmasının mümkün olmayacağını öne sürmüştü. Elbette Zenon kuantum mekaniğinden haberdar değildi, ama belirsizlik kuramı da bize benzer bir şey söyler. Yerin belirsizliğiyle momentumun belirsizliği ilişkilidir. Parçacıkların kesin olarak tanımlanmış yerleri ve momentumları olduğunu, ancak bizim bunu ölçecek durumda olmadığımızı söylemek yanlış olacaktır. Daha doğru ifade, ölçülemeyen nesneler hakkında konuşmanın anlamsız olduğudur. Belirsizlik ilkesi bir parçacığın aynı anda kesin belirlenebilir bir yeri ve kesin belirlenebilir bir momentumu olamayacağını söyler.

Bu fırsattan istifadeyle sözü kuantum mekaniğinin bir başka önemli kavramı olan dalga fonksiyonuna getirmek uygun olacaktır. Kuvvet alanında bir parçacığı gözlemleyelim. Belirsizlik ilkesi nedeniyle parçacığın kesin yerini bilemesek de, bir yerde bulunma olasılığı hakkında bir şey söyleyebiliriz. Örneğin 1/3 ihtimalle odanın bu yanında, 2/3 ihtimalle de başka bir yanında olduğunu varsayalım. Bu ihtimal, dalga fonksiyonu adını verdiğimiz karmaşık bir mekân fonksiyonuyla tanımlanır. Dalga fonksiyonunun mutlak değer karesi, yani $|\psi(x)|^2 = \psi(x)^* \psi(x)$ buradaki olasılığı oluşturur; burada $\psi(x)$ eşlenik-karmaşık fonksiyondur. Bu fonksiyonu içerisinde bulunduğumuz alana uyguladığımızda, parçacığın burada bulunma olasılığını elde etmiş oluruz. Görüyorsunuz ya Mr. Newton, kuantum mekaniği giderek daha kesin bir kurama dönüşüyor, ama aynı zamanda artık olasılıklardan bahseden bir kuram olduğundan hiçbir şey mutlak değil.

Erwin Schrödinger dalga fonksiyonunun nasıl hesaplanacağını buldu. Schrödinger denklemi olarak anılan basit diferansiyel hesapların çözümleri bunlar. Örneğin bir parçacığın momentumu gibi önemli büyüklükler dalga fonksiyonu yardımıyla bulunur. Dalga fonksiyonundan çıkartılan momentum denklemi şöyledir:

$$p = \frac{h}{2\pi i} \frac{d}{dx} \psi$$

Atomun münferit dalga fonksiyonları sürekli bir dizi oluşturmaz, tıpkı bir enstrüman telinin öz titreşimleri gibi. Bir tel ya temel titreşiminde ya da bir üst titreşimde salınır, ikisinin arasında bir frekansta değil. Tıpkı bunun gibi bir atom da ya temel hali içerisinde "salınır" ya da uyarılmış bir salınım gerçekleştirir. Böylelikle bir atomu

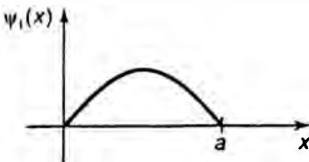
oluşturabileceği çeşitli sabit haller elde edilmiş olur.

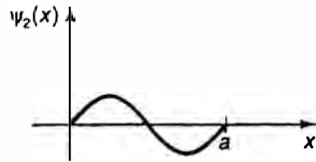
**FEYNMAN:** Schrödinger'in başta bu olasılık yorumunu kabul etmediğini söylemeden geçmeyelim. Atom halinin dalga fonksiyonunu, daha doğru ifadeyle dalga fonksiyonunun karesini meydana getiren Schrödinger denkleminin, bir parçacığın verili bir hacimde bulunma olasılığını ifade ettiği fikrini 1926 yılında Max Brod ortaya attı. Schrödinger o zamanlar bu yorumu ciddiye almamış, düpedüz beğenmemişti. Günümüzdeyse bu yorum haklılığını kanıtlamış durumda. Born 1954 yılında olasılık yorumuyla Nobel Ödülü'nü aldı.

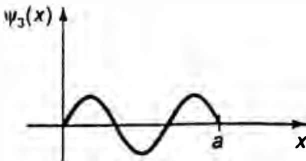
**HALLER:** Bence yeniden hidrojen atomuna dönelim: Bohr 1913'te hidrojen atomunun temel halini bir yörünge yardımıyla tanımlamıştı. Algılamayı kolaylaştırmak açısından elektronun da bir açısal momentumu olduğunu söylememiz gerekir. Ne var ki bu tamamen yanlış olur. Sizin kuramınızın aksine, temel haldeyken açısal momentum sıfırdır, Sir Isaac.

**HEISENBERG:** Şöyle düşünün: Elektron çekirdeğin etrafında bir oraya bir buraya salınır. Bu durumda birçok fotoğraf çektiğimizi düşünelim. Fotoğrafta muğlak bir dağılım, küre biçimli bir yapı görürüz: İşte bu dalga fonksiyonudur. Tam bir küre simetrisine sahiptir ve açısal momentumu yoktur.

Yirmili yıllarda üzerine çok kafa patlattığımız kuantum mekaniği hakkında üniversitede ders verirken kullandığım yönteme göre ilerlemeyi öneriyorum. Bunun için önce basit bir sistemi ele alaca-




İki duvar arasında kuvvet uygulanmadan hareket eden bir parçacığın temel hali ve iki farklı uyarılmış hali.

ğım. Bir parçacık iki duvarın arasında serbest bir şekilde hareket ediyor olsun. Gerçek hayatta kütleçekim nedeniyle var olmayan, yapay bir sistem bu, ama hızla ve kolayca çözülebildiğini göreceksiniz.

**NEWTON:** Bir parçacığın içinde rahatça sağa sola hareket edebildiği bir sistemden söz ediyorsunuz anladığım kadarıyla. İki duvar arasında kuvvet uygulanmadan hareket eden parçacık bir duvara çarptığında bunun uyguladığı kuvvetle geri itilir. Dönüş noktasındaki kuvvet sonsuz büyüklüğe kavuşur. Benim mekaniğime göre son derece basit bir sistem. Aradaki noktacık bir ileri bir geri hareket eder, enerjisi de herhangi bir düzeyde olabilir.

**HEISENBERG:** Kuantum fiziğinde durum biraz daha farklı. Başta kimi sorunlar yaşasam da, kısa sürede problemin Schrödinger denklemleriyle çözülebildiğini gördüm. Parçacığın dalga fonksiyonu nasıldır? Bu sistemde en düşük hal olarak adlandırılan bir durum, yani en küçük enerji vardır. Bu halin dalga fonksiyonu da aynı derecede basittir. Duvarlardan birinde başlayan ve diğerinde sona eren bir sinüs fonksiyonu. Dolayısıyla dalga fonksiyonu durağan bir dalgayı tanımlar. Bunu anlamak pek güç değil, çünkü dalga fonksiyonu, iki duvara raptedilmiş bir müzik enstrümanının teline benzetilebilir. Teli uyardığımızda, yani ona vurduğumuzda temel bir salınım elde ederiz, bu da en düşük enerji durumuna tekabül eder.

**NEWTON:** Peki uyarılmış haller nasıl görünür?

**HEISENBERG:** Bu hallerin dalga fonksiyonu da aynı derece basittir. İkinci halin dalga fonksiyonu yine sıfırla başlayıp tırmanır, ortalara doğru tekrar sıfıra düşer, sonra, yani parçacık diğer duvara ulaştığında tekrar sıfır seviyesine inmiş olur. Bu da basit bir sinüs fonksiyonudur. Bir sıfır noktası vardır. Bir sonraki halin iki sıfır noktası vardır, üçüncüsünün üç vs. Sıfır noktasından kasıt, burada bir parçacık bulunma olasılığının olmamasıdır. Dünyaya parçacık anlayışıyla bakıldığında bu durum anlaşılmaz gelebilir, ama dalga anlayışıyla mümkündür. Klasik fizikte parçacık sağa sola uçuşur, dolayısıyla bir yerde bulunma olasılığı asla sıfır olmaz. Kuantum kuramındaysa pekâlâ mümkündür. Bu da sizin mekaniğinizle çelişiyor, Sir Isaac.

**FEYNMAN:** İlgili enerjileri hesaplamak da son derece kolay, zira bunun için kullanılabilecek basit bir formüle sahibiz. Enerji seviyelerini elde etmek için Planck sabiti, parçacığın kütlesi ve kat ettiği yol

kullanılır. Formülün tam açılımını anlatmaya gerek yok ama hallerin enerjileri, sahip oldukları sıfır adetlerine 1 eklenerek bulunan n sayısının karesiyle orantılıdır. Yani ilk enerji 1, ikincisi 4, üçüncüsüyse dokuzdur. n sayısına kuantum sayısı adı verilir. Sıfır noktası bulunmayan temel halin kuantum sayısı 1, uyarılmış ilk aşamanın 2 vesaire diye gider.

**NEWTON:** Vay canına, gerçekten de pek basitmiş. Öyleyse kuantum kuramı da benim mekaniğim kadar basit, hatta belki de daha basitmiş.

**HEISENBERG:** Kuantum kuramı gerçekten de kimi durumlarda, en azından bu örnekte sizin mekaniğinizden daha yalın. Zaten örnek olarak seçmemin nedeni de buydu. Öte yandan oldukça karmaşık sistemler de var; işte o zaman işler biraz karışıyor.

Elimizdeki probleme dönelim: Enerji seviyelerinin kuantumla tanımlı aralıklara ayrılması, sonsuz derinlikte potansiyel kuyusu olarak da adlandırılan potansiyel kutunun atom boyutlarında olması durumunda bir rol oynuyor. Bu kutunun nispeten büyük, örneğin kenar uzunluğunun bir santimetre olduğunu varsayalım. Bu durumda iki enerjinin, mesela n seviyesiyle n + 1 seviyesinin arasındaki enerji farkı oldukça küçük, $n \cdot 6 \cdot 10^{-15}$ elektronvolt (eV) değerinde olacaktır. Bir elektronvolt, herhangi bir elektronun 1 voltluk bir gerilim farkını aşarken aldığı enerji miktarıdır. Komşu hallerin arasındaki enerji farkı son derece küçük olduğundan, kesintisiz bir enerji tayfımız olduğunu söyleyebiliriz. Oysa atom ebatlarında, örneğin $10^{-7}$ santimetrelik bir potansiyel kutu kullandığımızda, iki komşu enerji seviyesi arasındaki mesafe $n \cdot 0{,}68$ eV olur. Böyle bir enerji farkını kolayca ölçmek mümkün.

**NEWTON:** Yine de bana tuhaf gelen bir şey var. Parçacık tamamen hareketsiz de olabilir; bu durumda kutunun içinde kalacak, enerjisi de sıfır olacaktır. Ama anlaşılan böyle bir durum söz konusu değil, çünkü temel halin bile bir enerjisi var. Peki ama neden?

**HEISENBERG:** İşte tam da bu noktada belirsizlik ilkesi devreye giriyor. Kutunun büyüklüğü, yerin belirsizliğini tarif eder ve bundan hareketle momentumun belirsizliği de tespit edilebilir. Bunların çarpımı Planck sabiti ölçeğindedir. Momentumun belirsizliği sıfıra eşit olmadığı için, parçacığın mutlaka bir enerjisi olur. Bu da Feynman'ın az önce bahsettiği enerjinin ta kendisidir.

**NEWTON**: Yani yine sizin tuhaf ilkenize geldik, Herr Heisenberg – bu sayede enerji belirlenir ve sıfırdan farklıdır. Kuantum mekaniği gerçekten de tuhaf bir kuram. Demek ki parçacık hiçbir koşul altında hareketsiz kalmıyor, gerçekten garip. Ortaya attığınız belirsizlik ilkesi benim mekaniğimi tamamen baş aşağı ediyor.

**HEISENBERG**: Aslında düşündüğünüz kadar tuhaf değil, sadece belirsizlik ilkesine uygun davranıyor. Bu ilke her durumda geçerlidir ve sizin mekaniğinizin yetersiz kaldığı noktaları ortaya koyar, Sir Isaac. Klasik mekanikte belirsizlik yoktur.

Ernest Rutherford, 1919 yılında hidrojen atomunun çekirdeğini yeni bir parçacık olarak tanımlayıp ona proton adını verdi. Diğer atomların çekirdekleri de protonlardan müteşekkildir. Protonların sayısı, atom kabuğunu oluşturan elektronların sayısına eşittir.

Rutherford atom ağırlığının, dolayısıyla atom çekirdeğinin kütlesinin, bu kütleyi oluşturan protonların ağırlığından daha büyük olduğunu buldu. Bunun üzerine 1920 yılında atom çekirdeğinde protonların yanı sıra elektrik yükleri sıfır olan ve protonlarla aynı kütleye sahip başka parçacıklar da bulunması gerektiği sonucunu çıkardı. Aradan 12 yıl geçtikten sonra, 1932 yılında "nötron" adındaki parçacıklar nihayet keşfedildi.

**HALLER**: Beyler, saat neredeyse öğlen oldu. Şimdilik bir ara vermeyi teklif ediyorum. Bugün Gendarmenmarkt üzerindeki Lutter + Wegner restoranına gitmeye ne dersiniz? Burası 200 yıllık bir geçmişi olan ve Einstein'la Heisenberg'in pek yakından tanıdıklarını düşündüğüm, nevi şahsına münhasır bir restoran. Umarım mutfakları 1920'lerdeki kadar iyidir.

Nitekim teklif genel kabul gördü. Fizikçiler Gendarmenmarkt'ı kat edip konser salonunun önünden restorana ulaştılar. Yarım saat sonra mekânın kalitesini birinci elden tecrübe ediyorlardı. Restoranın spesiyalitesi olan dana madalyonu afiyetle yediler. Yanında da Würzburg yakınlarındaki bağların mahsulü olan Franken şarabı içtiler.

# 4

# Dalga ve Parçacık

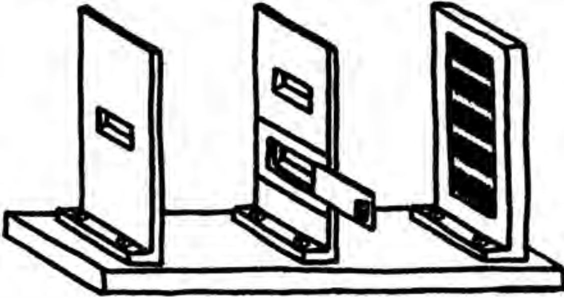
Herkesi tatmin eden bir yemeğin ardından beş fizikçi küçük bir yürüyüşe çıktılar. Unter den Linden Bulvarı boyunca yürüyüp Brandenburg Kapısı'na ve Alman Parlamento binasına vardılar. Akabinde Adlon Oteli'nde birer kahve içip Akademi'ye döndüler.

**FEYNMAN**: Şimdi özellikle Sir Isaac'i ilgilendiren bir probleme geliyoruz. Işık nedir? Siz başından itibaren ışığın dalga olduğu kuramını savundunuz. Ancak sonraki çalışmalarınızda, özellikle de *Principia* eserinizde ışığın parçacık kuramını desteklediniz. Kuramınızın ayrıntıları sonra René Descartes tarafından geliştirildi.

Öte yandan Bolognalı Francesco Grimaldi 17. yüzyılda ışığın dalga kuramını temsil ediyordu. Christiaan Huygens, ışığın su dalgalarıyla aynı fenomenleri sergilediğini, kırınım ve girişimler yarattığını keşfetti. Huygens ses dalgalarının havadaki yolculuğuyla ışığın yayılımı arasında bir analoji olduğuna dikkat çekti. Bunun sonucunda da, Sir Isaac, Huygens ile aranızda bir ömür sürecek bir tartışma başladı ve bir türlü uzlaşmaya varamadınız.

Thomas Young'ın 19. yüzyılda yürüttüğü çalışmalarla konu biraz daha somutluk kazandı. Young, daha iki yaşındayken okumayı sökmüş bir "harika çocuk"tu. Dört yaşına geldiğinde İncil'den alıntı yapabiliyordu. Bir kısmı Göttingen'de olmak üzere tıp eğitimi aldı ve 1799 yılında hekim olarak Londra'ya yerleşti. Tıp alanındaki çalışmalarının yanı sıra fizik ve kimya disiplinlerinde de deneyler yürüttü.

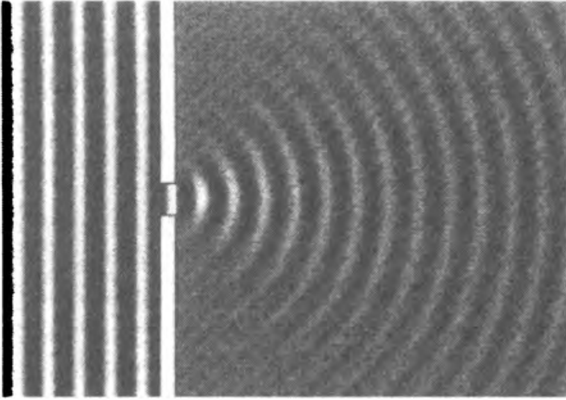
Işık üzerine yürüttüğü ilginç deneylerinden birinin sonuçlarını 1803 yılında yayımladı. Günümüzde çift yarık deneyi olarak bilinen bir düzenek hazırladı. Deney son derece basit bir ilkeye dayanıyor-



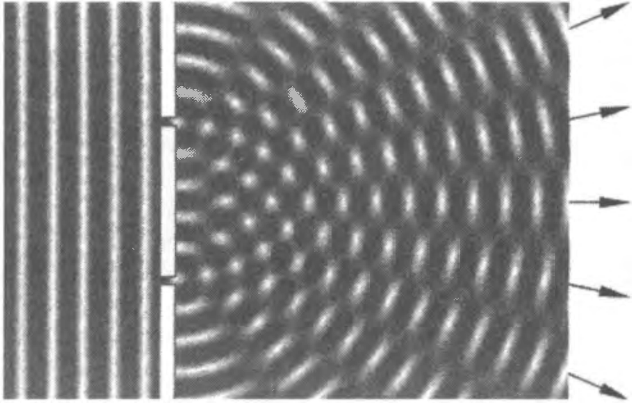
Çift yarık deneyi. Düzenek Niels Bohr tarafından tasarlandı. Işık soldaki delikten girer ve bir sonraki perdede içinden geçebileceği iki farklı yarıkla karşılaşır. Her iki yarık da açıksa ekranda aydınlık ve karanlık şeritler meydana gelir. Oysa tek yarık açık olduğunda, herhangi bir şeridin görülmediği eşit bir aydınlık dağılımı oluşur.

du. Düzenek, üzerinde birbirine yakın iki yarık olan bir metal levha ve arkasına gerilmiş bir perdeden oluşuyordu. Young her iki yarığı da tek renkli ışıkla aydınlattı. İki yarığın her birinden ince bir ışık huzmesi geçiyordu. Işık bir su dalgası gibi davranıyorsa, her bir yarığın ardındaki ışık huzmesi daireler şeklinde yayılmalı ve birbirlerine bindirme yapmalıydı. Bu durumda da perdede bir desen oluşurdu. Dalganın tepesinin bir başka dalganın tepesine denk gelmesi durumunda ışık bu noktada güçlenecek, oysa yarıkların birinden geçen ışık huzmesinin oluşturduğu dalganın tepesi diğer huzmenin oluşturduğu dalganın çukuruna rastlarsa karşılıklı olarak birbirlerini götürecekti. Dolayısıyla ışık gerçekten de bir dalga fenomeniyse, ekranda dönüşümlü olarak aydınlık ve karanlık şeritler meydana gelmeliydi.

Öte yandan ışığın parçacık olması halinde durum biraz daha farklı olacaktı. Bu kez çift yarıklı levhanın önüne bir makineli tüfek yerleştirip ateş ettiğimizi düşünelim. Namludan çıkan mermilerin bir kısmı bir yarıktan, bir kısmı diğerinden geçecektir. Bunun sonucunda perdede iki bölgede bir yoğunlaşma meydana gelir. İki yarık arasındaki mesafe çok küçükse, azami mermi izi muhtemelen ekranın tam ortasında olacaktır. İlk yarık kapatılırsa ekranda P(1), ikinci yarık kapandığındaysa P(2) dağılımı meydana gelecektir. Her iki yarık



Düz gelen su dalgası dar bir yarıktan geçerken bükülür. Yarığın ardında yay biçimli dalgalar meydana gelir ve uçlara doğru zayıflar.



Soldan gelen su dalgası duvardaki iki yarığa ulaşır. Her iki yarığın ardında, birbirleriyle girişim yapan yarım daire biçimli dalgalar oluşur. Dalgalar oklar doğrultusunda ilerlerken, aralarında sönümlenme gerçekleşir. Yarıklardan biri kapatılacak olursa girişim deseni kaybolur.

da açık olduğunda ortaya çıkan dağılım P(1) + P(2) toplamıdır. Şerit görülmez. Dolayısıyla dalgaların bindirmesiyle oluşan desen, tüfekten çıkan mermilerin dağılımından farklı olur. Parçacıkların adedi artarken, dalgalar birbirini ya güçlendirir ya da götürür.

Deneyi sonucunda Young, aydınlık ve karanlık şeritlerden müteşekkil bir desen elde etti. Işığın dalga özelliği kanıtlanmıştı. Şeritler arasındaki mesafe sayesinde dalga boyunu da hesaplamayı başardı ve kırmızı renk için 0,7 mikrometrelik bir değere ulaştı. Young bulgularını Royal Society of London'da sundu. Ama ışığın dalga olduğu görüşü ancak yirmi yıl sonra kabul gördü. Thomas Young'ın dalga kuramını en çok destekleyenler arasında, Paris Akademisi üyesi bir mühendis olan Augustin Jean Fresnel yer alıyordu. Işık dalgalarının varlığıyla Fresnel birçok optik fenomeni basit ve doğal biçimde açıklayabiliyordu.

**NEWTON:** Demek ki ışık gerçekte dalgaymış. Bu kez şansım yaver gitmemiş, kuramım yanlışmış. Bu fikre alışmak için biraz vakte ihtiyacım var. Işık bir dalga fenomeniyse her şey değişir. Dalgayla parçacık birbirinden çok farklı. Parçacık belli bir alana aittir, dalgalarsa büyük, yaygın sistemlerdir. Peki o zaman Einstein'ın fikirlerine ne oldu? O da benim gibi ışığın parçacık doğasından söz ediyor. Einstein'ın kuramı da mı yanlış?

**HALLER:** Einstein'ın kuramına da geleceğiz. Belki o konuda kendisi bir şeyler söylemek ister. 19. yüzyılda özellikle İngiltere ve Almanya' daki bilimadamları, Thomas Young'ın deneyine dayanarak ayrıntılı bir ışık dalga kuramı geliştirdi ve bu sayede birçok görsel fenomen açıklanır hale geldi. Carl Zeiss'ın 1846'da Almanya'daki Jena' da kurduğu ve sonradan Ernst Abbe ve Otto Schott'un da dahil olduğu Zeiss-Werke gibi şirketlerin meydana getirdiği yeni sanayi dalları oluştu. Abbe aynı zamanda Jena Üniversitesi'nde fizik profesörüydü. Dalga kuramına dayanarak son derece kesin hesaplamalar yapmayı başardı. Bu sayede Zeiss bünyesinde, gelişmiş dürbün ve mükemmel mikroskoplar yapılabildi.

Ne var ki 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in Würzburg'da kendi adıyla anılan röntgen ışınlarını keşfetmesiyle bir sorun ortaya çıktı. Bu ışınlar bükülmeye uğramıyordu, bu nedenle de on yıldan uzun bir süre gizemlerini korudular. Nihayet 1912 yılına gelindiğinde, Münihli Max von Laue röntgen ışınlarını kristallerle kırınıma uğ-

ratmayı başardı. Böylelikle röntgen ışınlarının da dalga karakterine sahip oldukları kanıtlanmış oldu. Günümüzde bu ışınların, tıpkı ışık gibi elektromanyetik özelliklere sahip olduğunu biliyoruz. Normal ışığa göre farkları, çok daha yüksek frekanslara sahip olmaları.

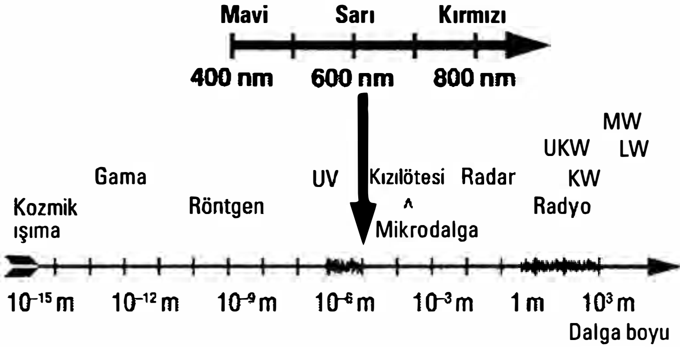
**FEYNMAN:** Sir Isaac, normal ışık, tüm elektromanyetik dalgaların sadece küçük bir kısmını meydana getirir. Gama ya da röntgen ışınımı gibi çok kısa dalgalı elektromanyetik dalgaların yanı sıra, örneğin radyo dalgaları gibi uzun dalga boyları da vardır. Gözle görülebilir ışık 400 ila 800 nanometrelik dalga boyuna sahiptir. Atomların çapından çok da büyük değil bu. Dolayısıyla görünür ışık, tüm elektromanyetik tayfın sadece küçük bir bölümüdür.

**NEWTON:** Bir an için ışığın bir dalga fenomeni olduğundan yola çıkalım. O zaman bir sorum olacak. Su dalgaları söz konusu olduğunda, ileri ve geri hareket edenin su olduğunu biliyoruz. Peki ya ışık? Burada titreşen şey nedir? Işığa özel bir madde mi var? Varsa, neden müteşekkil? Bu maddenin her yerde, sabit yıldızlar arasında olduğu gibi uzak galaksiler arasında da olması gerekmez mi?

**EINSTEIN:** Işık düştüğünde titreşmek dışında bir şey yapmayan özel bir maddeden söz edilirdi. Işık maddesi olarak da anılan bu maddeye eter adı verilmişti. Her yerde olan, her şeyin içine nüfuz edebilen tuhaf bir madde olmalıydı bu – hem dünyada hem de evrenin her yanında bulunan bir tür hayalet madde.

Sonra ilginç keşifler yapılmaya başladı. Her şey Danimarkalı fizikçi Hans Christian Ørsted'le başladı. Ørsted 1820 yılında öğrencilerine bir deney gösterdi. Deney esnasında çok ilginç bir olay gözlemledi. İçinden elektrik geçen telin yakınındaki pusulanın ibresi normal konumundan sapıyordu. Bu şekilde elektrik akımının manyetik etkiye neden olduğunu keşfetmiş oldu. Elektrik ile manyetizma birbirleriyle alakalı olmalıydı. Bir sonraki keşif Michael Faraday tarafından 1831 tarihinde İngiltere'de yapıldı. Faraday bir tel boyunca hareket ettirilen bir mıknatısın elektrik gerilimine neden olduğunu buldu. Günümüzde su türbinleri aracılığıyla elektrik üretiminde bu teknik kullanılıyor.

Faraday sadece deneyler yapmıyor, aynı zamanda bazı fikirlerin altına imza atıyordu. Elektriksel ve manyetik fenomenlerle ilgili yürüttüğü birçok deneyin yanı sıra, uzayda yayılan ve böylelikle eterin yerini alan elektriksel ve manyetik alanların varlığına inanıyordu.

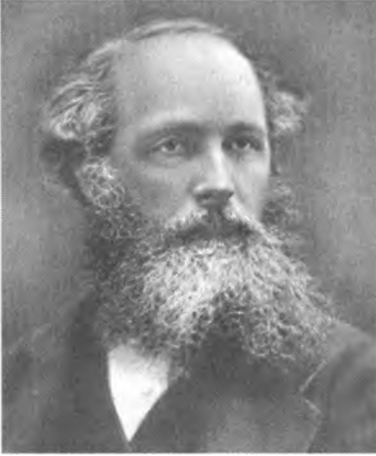



Elektromanyetik tayf çok küçük dalga boylarından bir kilometrelik dalga boylarına uzanır. Görünür ışık bir metrenin milyarda biri olan nanometre ölçeğinde, 400 ila 800 nanometrelik bir aralığı kapsar ve bu haliyle elektromanyetik tayfın sadece küçük bir parçasını meydana getirir.

Artık etere gerek kalmamıştı, zira bütün uzayı kapsayan alanlar keşfedilmişti.

Elektriksel ve manyetik alanlar karşılıklı etkileşim halindedir. Elektrik akımı, yani hareket halindeki bir elektrik yükü manyetik alan yaratabilir; zaman içinde değişen bir manyetik alansa elektrik alan oluşturabilir. Alan fikri harika bir çözümdü. Uzaya yayılanlar elektriksel ve manyetik kuvvet alanlarıydı ve etere gereksinim duymuyorlardı. Yine de 20. yüzyılın başına kadar eter gündemden düşmedi.

1873 yılına gelindiğinde, İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell, altmışlı yıllarda olgunlaştırdığı bir fikri, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Elektrik ve Manyetizma Üzerine İnceleme) adlı çalışmasında açıkladı. Maxwell'e göre elektriksel ve manyetik alanlar yakından ilişkiliydi; birbirlerinden ayrı olarak ele alınmaları mümkün değildi. Bu ikisi bir bütündü, dolayısıyla elektromanyetik alandan söz etmek gerekirdi. Elektriksel alan zamanla değişirse manyetik alan üretir; zamanla değişen manyetik alansa elektriksel alan meydana getirir. Maxwell denklemleri bu alanları tarif etmekteydi. Denklemlerde elektriksel ve manyetik alanlar birbirleriyle yakından ilintilidir.



James Clerk Maxwell (1831-79), elektrikle manyetizmayı birleştirdi. 1865 yılında elektromanyetik alanların tarif edilmesine yarayan Maxwell denklemlerini ortaya attı. Elektromanyetik dalgaların varlığını öngördü. Bu dalgalar 1886 yılında Heinrich Hertz tarafından keşfedilecekti. Maxwell 48 yaşında kanserden öldü.

Bunlar çok dikkat çekici denklemler. Yazıldıklarında henüz ortada görelilik kuramı olmasa da, Maxwell denklemlerinin aslında göreliliğe dayandığı sonradan fark edilecekti. Anlaşılan o ki, biraz daha yaşasaydı görelilik kuramını Maxwell de ortaya atabilirdi, ancak İskoç fizikçi erken bir yaşta hayata gözlerini yumdu. Bunun sonucunda da görelilik kuramını bulan o değil, ben oldum. Şansım da yardım etti. 1905 yılında görelilik kuramını keşfetmemiş olsam nasılsa bir başkası yapacaktı, örneğin Leiden'deki Hendrik Antoon Lorenz ya da Parisli Henri Poincaré. Her ikisi de çözüme çok yakındı; ama Maxwell kuramı 1890'dan önce çözebilirdi. Maxwell denklemleri, görelilik kuramı olmadan da büyük başarı kabul edildi. Adı geçen denklemler bugüne kadar değişmeden geldi – anlaşılan kusursuzlar. Newton mekaniği sahneyi görelilik kuramına bıraksa da, Maxwell denklemleri oldukları gibi kalmayı sürdürüyor.

Daha önce de dile getirdiğim gibi, zamanla değişen bir manyetik alan, zamanla değişen bir elektriksel alan üretir, bu da zamanla değişen bir manyetik alan üretir vesaire. Bütün bunları Maxwell denklemlerinde bulabilirsiniz. Sanırım bunun ne anlama geldiğini en iyi siz anlıyorsunuz, değil mi?

**NEWTON:** Evet, iki alanın birbirine bağlı olduğunu artık biliyorum. Biri diğerini üretiyor, aynı zamanda da tam tersi oluyor. Dolayısıyla

iç içe geçmiş bir tür dalga oluşturuyorlar. Peki Maxwell denklemleriyle tarif edilen elektriksel ya da manyetik, daha doğrusu elektromanyetik dalgalar bunlar mı?

**FEYNMAN:** Kesinlikle, zaten bu yüzden elektromanyetik dalgalardan bahsediliyor. Bunlar hayal ürünü değil ve Karlsruheli bir fizik profesörü olan Heinrich Hertz de 1886 yılında elektromanyetik dalgaların varlığını nihayet deneyle kanıtladı. Hertz bu dalgaları yapay yollarla üretmeyi, bir vericiyle yayıp bir alıcıyla kaydetmeyi başardı ve elektromanyetik dalgaların Maxwell tarafından öngörülmüş temel niteliklerini teyit edebildi. Hertz'in bu buluşu telsiz teknolojilerinin gelişimi için gerekli temeli meydana getirdi, kısa süre sonra da ilk radyolar kullanılmaya başladı. Günümüzde gezegenimiz, özellikle televizyon kanallarının yaydığı elektromanyetik dalgalardan oluşan bir denizde yüzüyor. Oysa televizyonda yayınlanan programların çoğuna baktığımda, keşke Hertz elektromanyetik dalgaları keşfetmeseymiş dediğim oluyor.

Maxwell, denklemlerini kullanarak bir elektromanyetik dalganın yayılma hızını hesapladı ve ışık hızına eşit, yani saniyede yaklaşık 300 bin kilometrelik bir değer buldu. Bu bir tesadüf değildi, zira ışık hızı, kendi denklemlerinde dolaylı olarak ortaya çıkan bir evrensel sabitti. Dolayısıyla fizikçi ışığın da elektromanyetik bir dalgadan ibaret olduğu sonucuna ulaştı.

**NEWTON:** Harikulade! Yani ışık bir elektromanyetik dalga fenomeni. Dalgalar etere hiç ihtiyaç duymadan uzay içerisinde yayılıyor. Demek ki parçacık kuramım tamamen yanlışmış. Beyler, ışığın dalga kuramı hepimize hayırlı olsun!

**FEYNMAN:** Bu kadar mütevazı olmayın, Sir Isaac. Kuramınızın o kadar da yanlış olmadığını göreceksiniz. Evet, ışık elektromanyetik bir dalgadır. Önemli olan dalganın boyudur. Radyo ve televizyon vericileri de aynı dalgaları üretir ama örneğin kısa dalga radyoda olduğu gibi 10 ila 100 metrelik görece büyük dalga boylarında. Gözle görülür ışığın dalga boyu yaklaşık olarak 0,00005 santimetredir. Işık bir dalga fenomenidir, Mr. Newton. Yurttaşlarınız Young, Faraday ve Maxwell çok iyi iş çıkardılar.

**NEWTON:** Pekâlâ, ama şimdi de sizin vardığınız sonucu anlayamıyorum, Herr Einstein. Az önce fotonlardan, ışık parçacıklarından söz

ediyordunuz. Yanlış mıydı tüm anlattıklarınız? Ben de sizin foton görüşünüzün, kuramımın hayata geçirilmiş hali olduğunu düşünmüştüm. Peki ne oldu sizin fotonlara? Bunlar parçacık mı, dalga mı?

**EINSTEIN:** O kadar da kolay olmadığını itiraf etmem gerekiyor. 20. yüzyılın başında ışığın doğasına dair önemli bir kriz yaşanmaktaydı. Daha önce de dile getirildiği gibi röntgen ışınlarında girişim gözlemlemek mümkün değil. Bu ışınlar dalga mı, parçacık mı? Röntgen ışınlarıyla kristaller üzerinde yaptığı deneylerle 1915 yılında Nobel Ödülü alan William Henry Bragg bir defasında şöyle demişti: "Pazartesi, çarşamba ve cuma günleri ışığın madde kuramını öğretiyorum, salı, perşembe ve cumartesileriyse dalga kuramını." Demek ki zavallı adam her gün ders vermek zorundaydı. Ama sonunda Max von Laue ve Henry Bragg kristaller üzerinde çalışırken röntgen ışınlarının eğildiğini ve girişim yaptığını buldular. Bu sayede atom boyutundaki dalga boylarını incelemek mümkün oldu.

Ancak o sıralarda ışığın bir parçacık fenomeni olduğuna işaret eden, örneğin fotoelektrik etki gibi deneyler yürütülmekteydi. Fotoelektrik etkide, tıpkı dün de bahsedildiği üzere, bir metal levhanın üzerine ışık tutulduğunda metalden elektronlar kopar. Metalde bulunan elektronlar sıkıca yerlerinde tutulmaktadır ve onları koparmak için belli bir asgari enerjiye ihtiyaç vardır. Heinrich Hertz ve Philipp Lenard fotoelektrik etkiyi sistematik olarak inceledi. Çalışmada, metal levhadan kopan elektronların kinetik enerjisinin, düşen ışığın rengine, yani frekansına bağlı olduğu ama şiddetiyle bir ilgisi olmadığı anlaşıldı. Klasik fizikte dalganın enerjisi, frekansına değil genliğine bağlı olduğundan, bu sonuç ışığın dalga olduğu görüşüyle çelişiyordu. Işığın yoğunluğu artırılacak olursa, levhadan kopan elektronların sayısı artıyor, ama enerjilerinde bir değişiklik olmuyordu.

Bunun üzerine kafa yorduktan sonra bir açıklama buldum. 1905 tarihli makalemde ışık ışınının yayılması esnasında enerjinin giderek genişleyen hacimlere dağılmadığını, parçalanmadan hareket eden ve ancak bir bütün olarak üretilip soğurulabilen yerel enerji paketlerinden oluştuğunu yazdım. Böylelikle ışık parçacığı da tabir edilen foton fikri ortaya çıkmış oldu. Yine de fotonun oluşturduğu fiziksel tablonun aklıma tam yattığını söyleyemezdim, zira ışığın dalga karakterini yok saymak da mümkün değildi.

Daha sonra, takvimler 1922'yi gösterirken, özellikle Arthur H.

Compton tarafından incelenen Compton etkisi sayesinde kuramımın doğru olduğuna dair açık bulgular elde edildi. Compton saçılan bir ışığın frekansının da değiştiğini tespit etti. Enerji ve impulsun, foton ile elektron arasındaki bir çarpışmadaki gibi davrandığını kanıtladı ve ışığın parçacıktan meydana geldiğini teyit etmiş oldu.

**HEISENBERG:** O kadar da basit değil – ışık parçacık olmanın yanı sıra dalgadır da. İşte tam bu noktada kuantum mekaniği devreye giriyor. Işığın hem dalga hem de parçacık karakterini birleştirmek ancak kuantum kuramıyla mümkün. İsterseniz önce Sir Geoffrey Ingram Taylor'ın 1915 yılında İngiltere'de gerçekleştirdiği basit bir deneyden bahsedeyim size. Taylor, deneyi için çok zayıf bir ışık kullandı. Kuantum kuramı nedeniyle çift yarık düzeneğindeki yarıktan bir kerede tek bir foton geçtiğini biliyordu. Düzeneğin arkasına hassas bir film gerdi. Her foton bu film üzerinde siyah bir nokta bırakacaktı. Düzeneği birkaç gün boyunca kendi haline bıraktı ve ardından filmi inceledi. Münferit fotonlar kullanılmış olsa da, Taylor deneyinde yine de girişim şeritlerinin meydana gelmiş olduğunu gözlemledi.

**NEWTON:** Bir dakika, böyle bir şey nasıl olabilir? Her defasında –mesela on dakikalık aralıklarla– tek bir foton geçiyorsa, fotonların ya bir yarıktan ya da diğerinden geçmiş olması gerekir. Dolayısıyla ortada herhangi bir şerit deseni olmaz. Eğer çok sayıda foton varsa, birbirlerini bir şekilde etkilemiş ve ortaya bir desen çıkarmış oldukları varsayılabilir. Birçok foton katıldığında ışık dalga gibi davranır. Münferit fotonlar sadece parçacıktır ve dalga oluşturamazlar.

**HEISENBERG:** Unutmayın Sir Isaac, Taylor'ın deneyinde yarıklardan biri kapatıldığında arkadaki film üzerinde girişim şeritleri görülmez. Anlaşılan foton yarıklardan birinden geçerken, diğer yarığın açık mı kapalı mı olduğunu bir şekilde anlıyor ve şerit deseninin oluşup oluşmaması buna bağlı oluyor. Yani girişim fenomeni, ancak birbiriyle çarpışıp kesişebilecek çok sayıda fotonun kullanılması durumunda ortaya çıkan bir fenomen değil, aslında her bir fotona özgü bir durum. Siz Herr Einstein, bu mesele yüzünden Niels Bohr ile birçok tartışma yürüttünüz.

**EINSTEIN:** Evet, parçacıkların hangi yarıktan geçtiğini kesin olarak tespit edebileceğimizi savunuyordum; ama bu durumda da az önce bahsettiğiniz sorunla karşı karşıya kalıyoruz. Bu sorunu tam olarak çözdüğümü iddia edemeyeceğim, Bohr'un da çözebildiğini sanmıyorum.

**HEISENBERG:** Bohr'un bu konuda bir sıkıntısı yoktu. Hem fotonun izlediği yolu bilmenin hem de ekrandaki şeritleri izlemenin mümkün olmadığını söyledi. Örneğin düzenekteki her yarığın arkasına, fotonların geliş yönüne dik hareket eden birer elektron ışını konabilir. Yarıklardan birinin yakınında foton bu elektron ışınıyla çarpışırsa fotonun bu yarıktan geçmiş olması gerektiği anlaşılır. İzlediği yol bu şekilde tespit edildiğindeyse ekrandaki girişim deseni kaybolur. Öte yandan deney, fotonların yolu bilinmeyecek, daha doğrusu bilinmesine izin vermeyecek şekilde düzenlendiğinde desen yeniden ortaya çıkar. Yani bize bir seçim hakkı tanınmıyor. Ya yolu bileceğiz ve girişim şeritleri olmayacak ya da yolu bilmeden sadece şerit deseniyle yetineceğiz. Yani girişim şeritleri, fotonun yolunu bilmediğimizin en net göstergesi.

**EINSTEIN:** Tanrım, şu kuantum mekaniği ne tuhaf bir kuram böyle! Kavramam mümkün değil. Benim için her zaman karanlık bir gizem olarak kaldı, bundan sonra da böyle olacak, bir tür hayalet hikâyesi. Buna doğabilimleri değil, bir tür ilahiyat denir beyler. Fotonlar hakkındaki çalışmamı hiç yazmasaydım keşke.

**NEWTON:** Abartıyorsunuz Herr Einstein. Şahsen kuantum mekaniğini son derece ilginç buluyorum, nihayet ilk bakışta anlamadığım bir şeyle karşılaştım. Elbette bu bir bilim, ne de olsa üzerinde derinlemesine düşünmek gerekiyor. Bu arada, Herr Einstein, hâlâ düşünce gücünüzü kaybetmediğinizi umuyorum. Kuantum kuramını hemen kötülemeyin böyle, bence harika bir kuram. Üstelik dünyaya gelmesine siz de katkıda bulundunuz.

**HEISENBERG:** Ayrıca kuantum mekaniği son derece kati bir kuramdır. Ekranda tek bir foton gözlemlediğimizde dahi, olasılığı hakkında bilgimiz olur. Bu mekanikte katiliğe yer olmasa da, olasılıklar hakkında kesin ifadelerde bulunabiliriz. Tıpkı doğumdaki gibi. Dünyaya gelecek olan bebeğin kız mı erkek mi olacağını bilmesek de, kız olma olasılığının aşağı yukarı yüzde elli olduğunu söyleyebiliriz. Kuantum mekaniğinin istatistiksel yorumunu başlarda ben de anlamakta zorlanmıştım. Bu fikri ortaya atan Max Born oldu. Dalga fonksiyonu, bir elektronun belli bir noktada bulunma olasılığıyla ilgilidir. Dalga fonksiyonunun karesi bize olasılığı verir.

Dalga fonksiyonu gerçek anlamda fiziksel bir dalga değil, bir tür hayalet alandır. Niels Bohr bir parçacığın hareketinin olasılık kural-



Olasılık yoğunluğu ilkesini kuantum mekaniğine kazandıran ve bunun için 1954 yılında Nobel Ödülü alan Max Born.

larına uyduğunu, ancak dalga fonksiyonundaki değişikliğin Schrödinger denklemiyle tarif edildiğini söylediğinde aslında bunu vurgulamıştı.

Max Born tarafından getirilen kuantum fiziğinin istatistiksel yorumu, doğa olaylarındaki kati nedensellik anlayışına vurulan son darbeydi. Schrödinger bunu kabullenmek istemedi. Hatta bir defasında, sonradan kendi adıyla bilim tarihine geçecek olan dalga denklemini tarif ettiği makalesini, Born ile benim bu denklemle yapacaklarımızı bilse hiç yazmayacağını söylemişti. Ama o zaman da Nobel Ödülü'nü alamazdı.

**NEWTON:** Tesadüf hakkında ne diyeceksiniz? Gündelik hayatımızda da sıklıkla tesadüflerden bahsederiz. Bir elma ağacının altında otururken başımıza bir elma düşebilir. Bana soracak olursanız bunun adı tesadüftür. Ancak elmanın düşmesi neden-sonuç ilişkisine dayalı, yani nedensel bir olaydır. Elmanın dalla bağlantısı epey zayıflamıştır ve küçük bir meltemin esmesiyle elma daldan kopup düşer. Görünürde tesadüfi bir olaya benzese de, aslında nedenselliğe boyun eğmektedir.

**HEISENBERG:** Haklısınız. Bu bağlamda bunu öznel bir tesadüf diye adlandırıyorum. Süreç hakkında ayrıntılı bilgiye sahip olmadığımızdan olayı tesadüf olarak görüyoruz. Ama sizin de ifade ettiğiniz üzere tesadüf değil bu. Elmanın ağaçtan tam da siz altında oturdu-

ğunuz sırada kopup düşmesinin bir nedeni vardı.

**NEWTON:** Sizlerin kuantum mekaniği çerçevesinde bahsettiğiniz tesadüf de böyle bir şey olamaz mı? Kesin süreci bilmediğimiz için tesadüf olarak adlandırıyoruz. Konuya daha yakından bakıldığında belki daha farklı bir durumla karşılaşacağız. Henüz hakkında bilgi sahibi olmadığınız gizli parametreler işin içinde olabilir.

**HEISENBERG:** Öyle denemez, hayır. En azından ben öyle olmadığını düşünüyorum ve eminim Mr. Feynman da bana katılacaktır. Gizli parametreler yok. Burada olan şey daha ziyade doğanın bize belli sınırlar koyması. Kuantum kuramında tesadüfün varlığı, bir olayın kesin nedenlerini bilmememizden değil, olayın kesin bir nedeninin olmamasından kaynaklanır. Parçacık iki yarıktan birinden geçme özgürlüğüne sahiptir. Her iki olasılık da mümkün olduğundan bir girişim deseni meydana gelir. Dolayısıyla kuantum mekaniğinde tesadüf, öznel değil nesnel bir olgudur. Doğanın izleyeceği yol önceden belirlenmemiştir ve daha ziyade olasılık ilkelerine göre işler. Hiçbir şey mutlak biçimde kesin değildir. İşte dünyamız böyle bir yer, Sir Newton, bir tesadüfler dünyası.

**EINSTEIN:** Ben bu konuda kuşkuluyum. Tarif ettiğiniz bir kumarhane dünyası. Ama ben dünyamızın böyle bir yer olmadığı görüşündeyim. Born'un istatistiksel yorumu beni de epey etkilemiş olsa da kimi kuşkularım vardı. İçimden bir ses bunun doğru yol olmadığını söyledi. İhtiyar'ın sırlarını keşfetmemiz için henüz erken olduğunu düşünüyorum. İhtiyar zar atmaz.

**FEYNMAN:** Doğumumuzdan itibaren makro ölçekli bir dünyada yaşıyoruz ve burası bir kumarhane dünyası değil. Her şeyin bir neden-sonuç zinciri vardır. Bir olay olur ya da olmaz. Kullandığımız kavramları da bu tecrübelerimize dayanarak geliştirdik. Ancak bunun tam anlamıyla doğru olduğunu söyleyemeyiz. Kuantum dünyasında, örneğin atom fiziğinde durum çok daha farklıdır. Makro düzeydeki kavramlar buraya uygun değildir. Fakat başka seçeneğimiz yok, dünyayı bu kavramlarla tarif etmek zorundayız. Bu nedenle de olasılık ilkesine ihtiyacımız var. Tüm bu kavramları kullanmamız, ancak olasılıklarla çalıştığımız takdirde mümkün. Böyle yapmayacak olursak bir sorunla karşı karşıyayız demektir, Herr Einstein.

**EINSTEIN:** Açıkçası bu durum benim aklıma yatmıyor. Kuantum ku-



Erwin Schrödinger (1887-1961), 1926 yılında, sonradan kendi adıyla anılacak denklemi yazdı. Kuantum mekaniğine dayalı sistemleri kesin olarak tarif etmeye yarayan bu denklem, 1933 yılında ona fizik dalında Nobel Ödülü getirdi.

ramının olasılık yorumu bende her zaman baş ağrısına sebep olmuştur. Benim ilkem basit: Tanrı zar atmaz. Ne o kumarbazdır ne de dünya bir kumarhane.

**HEISENBERG:** Niels Bohr'un size hep söylediği şeyi hatırlıyorsunuz, değil mi? Tanrı için koşullar öne sürmekten vazgeçin. Tanrı ne yaptığını pekâlâ biliyor ve bir şeyi yapıp yapamayacağını da Herr Einstein'a soracak değil! İhtiyar pekâlâ zar atar. Dünyamız da, her ne kadar bu kavramdan hoşlanmasam da bir kumarhanedir.

**FEYNMAN:** Herr Einstein, İhtiyar'ın zar attığını kabul edin artık. Başka türlüsünü yapması mümkün değil zaten. Dünya bir kuantum kumarhanesi. Kuantum kuramının olasılık yorumu, siz Herr Heisenberg tarafından oyuna dahil edilen belirsizlik ilkesi çerçevesinde daha bir önem kazanıyor. Bir parçacığın yerini kesin olarak tespit edebiliriz, ancak bu durumda momentumunu ya da hızını bilemeyiz. Öte yandan hızını bildiğimizde yeri belirsizleşir. Parçacığın konumundaki belirsizlikle parçacığın momentumunun belirsizliğinin çarpımı Planck sabitiyle sınırlandırılmıştır. Niels Bohr'un da vurguladığı gibi, yer ve momentum birbirini tamamlayan türde birimlerdir.

**HEISENBERG:** Mesele sadece ölçümlerle de kalmıyor. Parçacıkların kendisi de kesin niteliklere sahip değil. Bir kez daha parçacık davranışlarını makro ölçekli kavramlarla açıklamaya çalışma hatasını yapıyoruz. Gündelik yaşantımızda bir nesnenin belli bir hızının olma-

sı ve belli bir yerde bulunması son derece doğaldır. Ama kuantum dünyasının mikro ölçekli fiziğinde aynı durum geçerli olmaz. Mikrofizik bambaşka bir ortamdır ve bizim kaba gereçlerimizle tam anlamıyla kavranamaz.

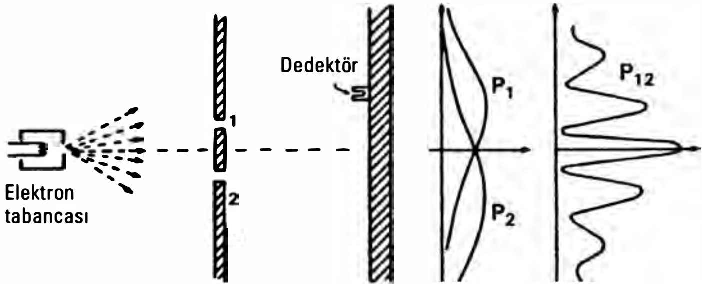
**EINSTEIN:** 1924 yılında Fransız fizikçi Louis de Broglie doktora tezinde ilginç bir önerme dile getirdi. Işığın bir yandan dalga, öte yandan benim varsayımıma dayanarak parçacık olduğunu biliyordu. Dalga ile parçacık arasındaki ikilik, de Broglie'nin aklından çıkmıyordu. Sonunda bu ikiliğin diğer parçacıklar, örneğin elektronlar için de geçerli olması gerektiği varsayımını ortaya attı.

De Broglie'nin tezi Paris'teki meslektaşlarının aklına yatmamıştı, o yüzden benim uzman görüşümü rica ettiler. Ricalarını yerine getirdim ve tez hakkında sadece olumlu şeyler yazdım. Tartışmaya açık fikirler içerse de, de Broglie'nin ortaya attığı fikri son derece ilginç bulmuştum. Bence büyük sır perdesini bir ucundan aralamayı başarmıştı. Yapılan deneyler kısa sürede varsayımının doğruluğunu teyit etti. 1927 yılında elektron ışınlarının kristallere çarparak saçılması izlendiğinde, röntgen ışınlarının saçılma tablosuna benzeyen bükülme görüntülerine rastlandı. Birkaç yıl sonra da sodyum atomlarıyla yapılan deneylerde atomların bükülme tabloları elde edildi.

Ama de Broglie'nin çalışmasının aklıma yatmayan yanları vardı. Çünkü şimdi neden sadece fotonların değil, diğer temel parçacıkların da bu tuhaf ikili karaktere sahip olduğunu –hem parçacık hem de dalga olabildiklerini– açıklamak gerekiyordu. Ben sebebini anlayamadım, anlaşılan de Broglie de öyle. Ama yine de bu çalışması nedeniyle 1929 yılında Nobel Ödülü aldı.

**HEISENBERG:** De Broglie'nin görüşünün kuantum mekaniğinin gelişimi açısından son derece önemli olduğunu söylemek gerek. Nitekim bu düşüncenin, dalga-parçacık ikiliğine atıfta bulunan dalga mekaniği adını alması da bu yüzden. Kuantum mekaniğinin gelişimi, atom kabuğunun daha iyi anlaşılmasını sağladı.

Dalga-parçacık ikiliğine dair son bir not: Elektron ışınına yakından bakalım. Elektron parçacık olduğundan, aslında parçacıklardan oluşan bir ışındır bu. Ama bu ışını ince madde katmanlarından geçmeye zorladığımızda girişim fenomenine rastlarız. Yani ortaya dalga fenomenine benzer bir görüntü çıkar ve elektronlar az önce bahsettiğimiz tuhaf ikili karakteri sergiler. Bir yandan parçacıktırlar, ama




Elektronlarla yapılan çift yarık deneyi. İkinci yarık kapalı olduğunda $P_1$, ilki kapalı olduğundaysa $P_2$ dağılımı oluşur. Her iki yarık da açık olduğundaysa $P_1$ ile $P_2$ toplamı değil, su dalgalarınınkine benzer bir girişim deseniyle $P_{12}$ dağılımı görülür.

aynı anda dalga gibi de davranırlar, tıpkı de Broglie'nin öngördüğü gibi.

**FEYNMAN**: Çift yarık deneyini ışık yerine elektronlarla da yapmak mümkün. Şimdiden söyleyeyim, deneyin sonunda su dalgalarındaki gibi girişim desenleri oluşur.

**NEWTON**: Neden girişim oluştuğunu anlamıyorum. Her bir elektronu yarıklardan birinden geçerken gözlemleyebiliriz.

**FEYNMAN**: Bunu yapmak için elektronların üzerine ışık tutmamız gerekir. Bu yapıldığındaysa girişim deseni oluşmaz. Elektronlar gözlemlendiklerinde normal parçacık, gözlemlenmediklerindeyse dalga gibi hareket eder. Kulağa çok gizemli bir olay gibi geliyor ama aslında hiç de öyle değil. Elektronların izlenebilmesi için ışık dalgalarına ihtiyaç var ve bir ışık dalgası bir elektronla buluştuğunda elektronun izlediği yol sapar. Bu sırada da girişim engellenmiş olur. Yakın zamanda bu deney nötronlarla, ardından atomlardan oluşan ışınlarla tekrarlandı. Nispeten büyük atomlar dahi bu deneylerde dalga davranışı sergiliyor. Altmış ya da daha çok karbon atomundan meydana gelen minik futbol toplarına benzeyen devasa moleküller olan Fulleren'lerin kullanıldığı deneyler de yapıldı. Burada da yine girişim desenleri görüldü. Yani bunlar da dalga özellikleri göstermekte.

Bir elektron nasıl olup da aynı anda hem parçacık hem de dalga olabilir? Parçacıkların hareketlerine ilişkin alışıldık anlayışımız, atom düzeyindeki süreçleri kavramakta yetersiz kalıyor. Anlayışı-

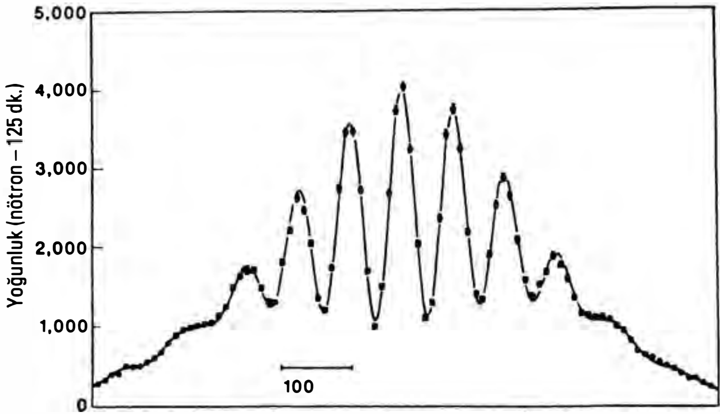
mızı oluşturan, atom düzeyinden çok daha büyük, gözle görülür nesnelere ilişkin insani tecrübelerimiz. Atom ölçeğinde olan biteni anlamak için bu anlayıştan vazgeçip yerine yeni görüşler ikame etmeliyiz. Mikro düzeydeki fiziğin kanunları makrofizikten farklıdır. Günümüzde dalga ve parçacık anlayışını eşit ağırlıklı olarak kullanıyoruz, zira olaylar ne biri ne de diğeriyle tek başına tarif edilemiyor, her ikisine de gereksinim var. Doğayı doğru gözlerle görebilmek ve anlamak için her iki gözlüğü de aynı anda takmamız gerekiyor.

**NEWTON:** Tanrım, ne kadar da karmaşık. Şimdi bir de iki ayrı gözlükle mi uğraşmak zorundayız? Elektronlar bir taraftan parçacık, diğer taraftansa dalga, ama aslında her ikisi de değil. Olanları parçacık gözlüğümle izlediğimde elektron parçacık, dalga gözlüğüyle ise dalga olarak görünüyor. İtiraf etmem gerekiyor ki insanın başı dönüyor bu durum karşısında. Bohr'un haklı olduğu konusunda şüphem yok, ama ben dünyaya gözlüksüz bakmayı tercih ederim.

**HEISENBERG:** Bahsettiğimiz kuantum mekaniği, Sir Newton, klasik Newtoncu mekanik değil. Burada gözlüksüz hiçbir şey göremezsiniz. Atomu net bir biçimde kavrayabilmek açıkçası oldukça zorlu bir iş. Gözlemlenebilir olanın sınırlarında dolaşıyoruz.

Gelin hidrojenin atom kabuğuna bakalım. Özel bir kamerayla çok sayıda fotoğraf çekecek olursak, elektronun çekirdeğe kimi zaman yakın kimi zamansa daha uzak bir mesafede, bir orada bir burada bulunduğunu görürüz. Nihayetinde elektronun bu yerlerden herhangi birinde bulunma olasılığına dair bir fikrimiz olur. Yani elektron için olasılık dağılımı tespit edilir. Elektronun kesin yerini tespit etmekte ancak bu kadar ileri gidebilirsiniz. Bohr da doğrusunu yaptı; bu noktadan öteye geçmedi. Tek bir konuda yanlışı vardı. Hidrojen atomundaki elektronların gerçek anlamda yörüngesi yoktur; bunlar aslında istatistiksel olarak dağıtılmıştır ve burada da olasılık yasaları geçerlidir. Elektronlar çekirdeğin etrafında dönmez, titreşirler.

Böylesi bir olasılık dağılımı bir dalgaya, daha doğrusu durağan dalgaya benzer. Bu da bizi dalganın de Broglie yorumuna götürür. Dalga genliğinin karesi, bize söz konusu noktadaki madde yoğunluğunu verir. Böylelikle bir enstantane alındığında elektronun söz konusu noktada bulunma olasılığını gösterir. Atom çekirdeğini çevreleyen durağan dalgalar, elektronları çekirdek çevresinde durağan




Çift yarıktan geçen nötronlar bir girişim örüntüsü oluşturur. Buradaki çizgi kuantum mekaniğinin öngörüsünü temsil etmekte. Bu da deneyin kuramla mükemmel biçimde örtüştüğünü gösteriyor.

dağılımda tutar. Burada bir dalga fonksiyonundan bahsedilmesinin nedeni budur.

Genç bir fizikçi olarak olağanüstü bir fenomen olan kararlılık hakkında uzun uzun düşünürdüm. Kararlılıktan kasıt, örneğin kimyasal tepkimelerden hep aynı ürünlerin çıkması. Aslına bakılırsa iki hidrojen ve bir oksijen atomunun birleşip su molekülü oluşturması tuhaf bir durum değil mi? Klasik mekaniğin yasaları çerçevesinde gerçek bir mucize. Buradan atom ve molekül dinamiğinin klasik mekaniktekinden farklı olması gerektiği sonucuna ulaştım. Ama sorunu çözmenin yolunun ne olduğunu henüz kavrayamamıştım.

Platon'un *Timaios* diyaloğunu okurken ünlü filozofun atomlar hakkında söyledikleri ilgimi çekti. Platon atomların küçük dik üçgenler olduğunu ve bunların küp, dörtyüzlü, sekizyüzlü ya da yirmiyüzlü gibi Platonik cisimler oluşturabildiğini yazmıştı. Bunların her biri, dört ana element olan toprak, ateş, hava ve suyu meydana getiren temel birimlerdi. Bu konuda kuşkularım vardı, ancak *Timaios*'u okuduğumda Platon'un mecazen haklı olabileceğini düşündüm. Anlaşılan atom ve moleküller yepyeni matematiksel yapılardı ve önce bunların keşfedilmesi gerekiyordu.

Elbette Niels Bohr'un görüşlerinden haberdardım. Bohr hidro-

jen atomundaki elektronun hareketinin klasik bir hareket olduğunu varsaymış, ama bunu henüz tam anlamıyla açıklayamadığı kuantum koşullarına tabi kılmıştı. Böylelikle hidrojendeki elektronun yörüngesi, yapılan fiziksel gözlemlerle mükemmel uyum sağlayacak şekilde tarif edilmiş oluyordu.

**EINSTEIN:** Bohr kuantum koşulları bana o zamanlar da çok tuhaf gelmişti. Koşullar atom fiziğine nümerolojiyi sokuyordu. Eski Pisagorcuların gözlemlerini hatırladım. Aynı gerginlikteki iki telin titreşmesinin, ancak tellerin uzunlukları birbirinin tam katı olduğunda uyumlu bir ses ürettiğini söylemişlerdi. Gerçi şimdi atomun içindeki elektronların hareketlerinin tellerin titreşimiyle ne ilgisi olduğunu düşünüyor olmalısınız.

**HEISENBERG:** Işığın atomlar tarafından soğurulması da tuhaf bir olgu. Böylece sizin ışık kuantası varsayımınızla açıkladığınız fotoelektrik etkiye geliyoruz. Her ne kadar atom düzeyindeki süreçler hakkında siz de bir açıklama yapmaktan uzak olsanız da, neyse ki buna gerek kalmadı. Bohr'un varsayımına göre bir elektron bir yörüngeden diğerine sıçrar ve bu esnada tek bir ışık kuantumu şeklinde enerji salar. Bunu sebebi ne olabilir? Zihnimi meşgul eden sorulardan biri de buydu. Niels Bohr'un nümerolojisini çok etkileyici bulduğumu söylemeliyim. Bu sistem bu kadar iyi işlediği için de, atomun parçacık yörüngeleri ilk kez kuşkuyla karşılanmaya başladı. Tüm bunların arkasında başka bir şeyler olmalı, araştırılması gereken yeni matematiksel yapılar bulunmalıydı.

**NEWTON:** Evet, gerçekten de düşündürücü. Önce yörüngelerin hesaplanması için benim mekaniğimden faydalanıldı, sonra Bohr kuantum koşulları bir Şark halısı gibi üzerine örtüldü ve buradan atomların kararlılığına ulaşıldı. Buna göre hidrojen atomundaki elektronun yörüngesi burada da aynıydı, ırak bir yıldızda da. Açıkçası Bohr benim mekaniğimi oldukça garip biçimde kullanmış ama bu sayede en azından hidrojen atomunu açıklamayı başarmış. Deneylerin onun ileri sürdüğü fikirleri desteklediği aşikâr, ancak bunun neden böyle olduğunu kimse anlayamamış sanırım.

**HEISENBERG:** 1925 yılının mayısında tutulduğum saman nezlesine çare olsun diye Helgoland Adası'na gitmeye karar vermiştim. Ada Kuzey Denizi'nin tam ortasında, çiçek açan polenli çayırlardan uzakta bir yerdeydi. Buranın sağladığı yalnızlık, önemli bir keşif yapmama

olanak tanıdı. Bohr'un, Münih'teki hocam Sommerfeld tarafından geliştirilmiş kuantum koşulları yerine, kurgusal elektron yörüngeleri yerine salt gözlemlenebilir nicelikler, titreşim frekanslarıyla ilgilenen yeni koşullar oluşturdum. Bu sayede kendi içinde tutarlı bir kuram geliştirebildim ve aslında matematiğim çok kuvvetli olmasa da, kuramın temelinde yeni bir matematik türünün yattığını sezdim.

Başta derinden sarsılmıştım. Atom fenomenlerinin yüzeyinin altına dalıp tuhaf güzelliklerden oluşan derin bir zemin gördüğüm duygusuna kapıldım ve doğanın derinlerde bana sunduğu sayısız matematiksel yapının peşine düşmem gerektiği düşüncesiyle başım döndü.

Kendi getirdiğim niceliklerle hesaplamalar yapmaya koyuldum. Aslında matrislerle çalışıyor olduğumu ancak Göttingen'e döndüğümde Max Born'dan öğrendim. O zamanlar matrislerin ne olduğunu bilmiyordum. Biliyorsunuz, çarpma işleminde değişme ilkesi geçerlidir. Üçle beşin çarpımıyla beşle üçün çarpımı aynı sonucu verir. Ancak matrislerde durum farklı. A x B, B x A'ya eşit değildir.

Max Born, benim Bohr kuantum koşullarına getirdiğim yorumu, özellikle de p'nin momentumu, $x$'inse koordinatları verdiği $x$p çarpımını ve bunun alternatifi p$x$ çarpımını inceledi. Böylelikle yeni bir çarpım tanımı getirmiş oldum. Bohr bu çarpımın değişme özelliği olmadığını buldu. Çarpanların yeri değiştiğinde sonuç da değişiyordu; yani $x$p çarpımı, p$x$ çarpımına eşit değildi. Bunun sonucunda $xp - px = i\hbar$ denklemine, yani benim ortaya attığım belirsizlik kuramının matematiksel ilkesine ulaştı. Gerek p momenti gerekse $x$ koordinatları, klasik mekanikteki gibi normal rakamlar değil, matematik kurallarındaki operatörlerdir.

**HALLER:** Doğumunuzun 100. yılı olan 2001'de benim de aralarında bulunduğum bir grup bilimadamı Helgoland'a gitti. Burada kuantum kuramının doğumunun andacı olarak bir kayanın içine oyulmuş anıtın açılışını yaptık. Fırsattan istifade, tıpkı sizin 1925'te yaptığınız gibi Helgoland'ın kayalıklarına tırmandım. Büyük bir yenilik olan kuantum kuramının aklınıza, bir kayanın üstüne çıkıp orada gündoğumunu beklerken geldiğini yazmıştınız. Ne yazık ki bu kayalık yıllar önce adayı vuran bir fırtınaya yenik düştü.

**EINSTEIN:** Yani kuantum kuramının doğum yeri ortadan kayboldu. Keşke kuramın kendisi de kayayla beraber sırra kadem bassaydı.

**NEWTON:** Yapmayın lütfen, Herr Einstein. Şöyle bir deney düşünelim, Herr Heisenberg. Bir lazer diyodu kullanarak münferit fotonlar ürettiğimizi varsayalım. Elimizdeki ışık kaynağı, dakikada tek foton üreten, oldukça soluk bir kaynak olsun ve karşısında, ışığın yarısını sağa yansıtan, kalan yarısınıysa geçiren bir ayna bulunsun. Bir fotonu parçalamak mümkün olmadığına göre bu durumda ne olur?

**HEISENBERG:** Size bu sorunun cevabını hemen vereyim. Foton ya sağa yansıtılacak ya da aynanın içinden geçecektir; ama bunları yaparken daima bütün bir foton olarak kalacaktır. Aynanın sağına ve aşağıya birer foton alıcısı yerleştirebiliriz. Sağdaki alıcıya 0-cihazı, aşağıdakineyse 1-cihazı adlarını verelim. Ardından deneyi başlatıp 0 ve 1 cihazlarının kaç defa foton algıladıklarını not edelim. 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 şeklinde bir sayı dizisi elde ettiğimizi düşünelim. Tamamen tesadüfi bu dizide onuncu fotonun nereye gideceğini, gerçekleşmeden hesaplamak mümkün değildir. 0 da çıkabilir, 1 de. Kimse sonucun ne olacağını önceden bilemez. Ama deneyi yeterince uzun süre tekrarlarsak, ortalamada 0'larla 1'lerin sayısı aşağı yukarı aynı olacaktır. Yukarıdaki örnekte her iki rakam da onar kez yer alıyor. Kuantum kuramının olasılıklarla ilgili olduğunu göstermesi açısından güzel bir örnek olduğunu düşünüyorum.

Sizin geliştirmiş olduğunuz mekanikse, Sir Newton, kati bir kuramdır, her şey yüzde 100 kesinlikle gerçekleşir. Kuantum mekaniği için geçerli olmayan bir durum, zira burada sadece olasılıklar hüküm sürmektedir. Yani yukarıdaki sayı dizisinin devamında 0 gelme olasılığı tam olarak yüzde 50'dir. 1 geldiğindeyse bir sonraki sefer yine 1 gelip gelmeyeceğini bilemeyiz. Dünya bir kumarhanedeki rulet masasına benzer. Bir parçacık hiçbir koşul altında kesin bir yere ve kesin olarak tespit edilebilir bir hıza sahip olamaz. Yeri ne kadar tutarlı biçimde tayin edilirse, hızı aynı oranda muğlaklaşacak, tersi için de aynısı geçerli olacaktır.

**HALLER:** Değerli meslektaşlarım, şimdi ilk kez Schrödinger'in ortaya attığı bir sorunu tartışalım isterseniz. Kuantum mekaniğinin olasılık yorumu Schrödinger'in aklına hiçbir zaman tam anlamıyla yatmamıştı. Bunu anlatmak içinse şu düşünce deneyini ortaya atmıştı: Radyoaktif bir atomla bir kediyi bir kutunun içine yerleştirelim. Söz konusu atom bir dedektörün içinde yer alsın ve bir saat içinde bozunuma uğrama olasılığı yüzde 50 olsun. Dedektör, atomun bozunu-

munu algıladığında bir çekici tetikleyecek, bu da kediyi öldürecek zehri ihtiva eden tüpü kıracak olsun.

Şimdi karşımıza çıkan soru, kutu içindeki kedinin kuantum mekaniksel bir hayvana dönüşüp dönüşmediği. Gözlemleyemediğimize göre kedi ne ölü ne de canlıdır, dolayısıyla her iki halin üst üste bindiğini varsaymamız gerekir. Schrödinger'e göre bu tuhaf bir durumdur, zira kedinin gerçek hayattaki karşılığı ("canlı kedi" + "ölü kedi")/$\sqrt{2}$ olmalıdır.

**EINSTEIN:** Buna tuhaf değil, düpedüz saçma denir. Kutunun üzerinden içeri bakıp kedinin canlı mı ölü mü olduğunu söylemeye imkân tanıyan bir pencere olsun. Canlı ile ölü arasında bir hal olamaz. Ben ortada bir sorun göremiyorum. Kutunun içindeki ben olsaydım, o zaman da herhalde ("canlı Einstein" + "ölü Einstein")/$\sqrt{2}$ durumunu tartışıyor olacaktınız. Daha neler! Ya hayattayımdır ya da ölmüşümdür, o kadar. Arada başka bir hal olamaz.

**FEYNMAN:** Ben de burada bir sorun göremiyorum. Örneğin aradan bir saat geçtiğinde kedinin hâlâ hayatta olma ihtimali yüzde 50'dir. Sonunda kedi ölecektir; ben de bu olayın ne zaman gerçekleştiğini kesin biçimde gözlemleyebilirim. Schrödinger bunu neden bir sorun olarak algıladı, anlayamıyorum.

**HEISENBERG:** Katılıyorum. Bence de ortada bir sorun görünmüyor. Açıkçası tartışmaların kuantum mekaniksel bir kedi üzerinden yürütülmesini doğru bulmuyorum.

Bohr kuantum koşullarının, doğrudan kuantum mekaniğinden çıkarılabileceğini de söylemek lazım. Schrödinger denklemi kullanılarak Bohr kuantum koşullarına ulaşılabilir; ancak kati olarak değil, sadece birinci yaklaştırımda. Dolayısıyla Bohr koşulları mutlak doğru kabul edilemez.

İzninizle kuantum fiziğinin bir başka ilginç yönünden bahsedeyim. Sir Isaac, sizin kurmuş olduğunuz mekanikte bir sistem içerisinde bulunan parçacıkları kesin biçimde ayırt etmek mümkün. Onlara bir numara ya da isim atanabilir ve yörüngeleri takip edilebilir. Örnek olarak Hans parçacığı şu köşeye doğru uçsun, Peter parçacığıysa diğerine.

Belirsizlik ilkesi nedeniyle kuantum fiziğinde bunu yapmak mümkün değildir. Parçacıklar bu düzlemde özgünlüklerini yitirir. Herhangi bir yerde gördüğüm elektronun, daha önce gördüğüm

elektronla aynı olup olmadığını anlamamın herhangi bir yolu yoktur. Parçacıklara isim veremeyiz. Ancak belli bir hacim içerisinde tek bir elektronun varlığını kesin olarak biliyorsam, bir parçacık özgünlüğünü koruyabilir. Aynı hacim içerisinde iki elektron yer alıyorsa, bunları birbirinden ayırmak mümkün değildir. Elektronlardan birine Hans, diğerine Peter diye isim takamam. Ancak isimleri Hans-Peter olan ve birbirlerinden ayırt edilemeyen iki parçacıktan söz edebiliriz. Tıpkı tek yumurta ikizlerinde olduğu gibi. Parçacıkların ayırt edilemez olmaları, kuantum fiziğinin son derece incelikli bir niteliğidir. Deneyimleyebildiğimiz dünyada böyle bir olay gerçekleşemez, bir parçayı işaretleyebilir ve her an hareketlerini takip edebiliriz. Ne var ki mikro ölçekli fizikte bunu yapamayız.

**EINSTEIN:** Kuantum mekaniği tuhaflığını bir kez daha gösterdi. Peki bu durumda münferit parçacıklardan söz edebilir miyiz?

**HEISENBERG:** Elbette. Parçacıklar vardır, ancak kuantum fiziğinde bu kavram klasik mekaniktekinden farklı tarif edilmiştir. Herr Einstein, kuantum mekaniği çok yeni bir olgu. Üstelik klasik mekanikten alabildiğine farklı.

**HALLER:** Beyler, yeterince kavga ettik sanırım. Şimdi kısa bir mola vermeyi öneriyorum, ne dersiniz?

Mola tahmin ettiklerinden daha uzun sürdü. Fizikçiler hep beraber Alexanderplatz'a yürüdüler, oradan Pergamon Müzesi önünden ıhlamur ağaçlarıyla çevrili Unter den Linden Bulvarı'na girdiler. Friedrichstraße üzerindeki bir kafede oturduktan sonra güneye, Potsdam Meydanı'na uğradılar.

# 5

# Kuantum Fiziğinde Titreşimler

İki saatlik yürüyüşün ardından beş fizikçi yeniden Akademi'ye dönüp tartışmalarına kaldıkları yerden devam ettiler.

**FEYNMAN:** Herr Heisenberg, bizlere bir başka basit sistemi, harmonik osilatörü anlatmaya ne dersiniz? Yanlış biliyorsam düzeltin lütfen, ama sanırım yirmili yıllarda bu konuyla ilgili yoğun çalışmalarınız oldu.

**NEWTON:** Harika. Gerçekten de harmonik osilatör yakından tanıdığım bir sistem. Kuantum mekaniğinin osilatörle nasıl başa çıkacağını merak ediyorum doğrusu! Klasik fizikteki kadar kolay olmayacaktır herhalde. En azından bir önceki sistem olan serbest nokta kütle sisteminden daha karmaşık olmasını bekliyorum.

Klasik mekanikte harmonik osilatörü hesaplamak kolay. Bir yayın ucuna tutturulmuş bir kütlemiz var. Osilatör serbest bırakıldığında, yani nokta denge noktasından belli bir mesafe uzaklaştığında yay bir kuvvet uygular; kütle başlangıçtaki denge noktasından ne kadar uzaklaşırsa yayın uyguladığı kuvvet aynı oranda büyük olur. Kuvvet, kütle çarpı ivme olduğundan formül $md^2x / dt^2 = -kx$'tir. Burada m kütle, x yol ve k yay sabitini ifade ederken, $d^2x / dt^2$ ivmeyi verir.

Bu denklemin çözümü bellidir, x = A sin (ωt); A değeri herhangi bir sabit, ω ise salınımın frekansıdır. Bu frekansın hesaplanması için kütleye ve kuvvet sabiti *k*'ya ihtiyaç vardır: $\omega = \sqrt{k/m}$. Sinüs fonksiyonunun son derece ilginç bir özelliği, ikinci diferansiyelin fonksiyonun kendiyle orantılı olmasıdır. İvmeyi hesapladığımızda, bunun

gerçekten de yer ile orantılı olduğunu görürüz. Salınımların kati olmaları da ilginçtir. Sadece belli frekanslar oluşur. Kuantum mekaniğindeki durum nedir peki?

**HEISENBERG:** Sorunuza hemen cevap vereceğim, Sir Newton. Wolfgang Pauli ile beraber Münih'te Arnold Sommerfeld'in doktora öğrencisiyken atom fiziğinin sorunlarıyla boğuşuyordum. Günün birinde Pauli yanıma geldi ve osilatörü kuantum mekaniksel açıdan incelememi söyledi. Hemen kolları sıvadım. Problemi kendine has bir cebir türüyle çözmeyi başardığımda son derece yalın bir sonuçla karşılaştım. Benden sonra Erwin Schrödinger de osilatör problemini farklı bir yolla çözüp yine aynı sonuca ulaştı. Aslında Schrödinger'in izlediği çözüm yolunun benimkinden daha basit olduğunu bile söyleyebiliriz.

Schrödinger osilatör problemi için, matematiksel açıdan basit bir diferansiyel hesabı olan bir denklem hazırladı. En basit halden yola çıkacak olursak, osilatörü tek boyutta ele almamız gerekir. Şimdi en basit durum, yani osilatörün tek boyuttaki hareketleri için çözümlere bakalım. Önce yeni bir parametre, yani $b = \sqrt{h/2\pi m\omega}$ formülüyle verebileceğimiz osilatör uzunluğunu ekliyorum. Bu uzunluğu $b$ birimiyle ölçecek olursam, en düşük konuma sahip temel halin dalga fonksiyonu için şu sonuca ulaşırım: $\phi_0 = \pi^{-1/4} e^{-x^2/2}$. Bu halin n üssü temel haldeyken sıfıra eşittir.

Halin enerjisi $E = h\omega/4\pi$. İlk uyarılmış hal, yani n = 1 için $\phi_1 = const.e^{-x^2/2}2x$ elde ederiz. Buradaki sabit (*const.*), dalga fonksiyonu 1'i norm alacak şekilde seçilir.

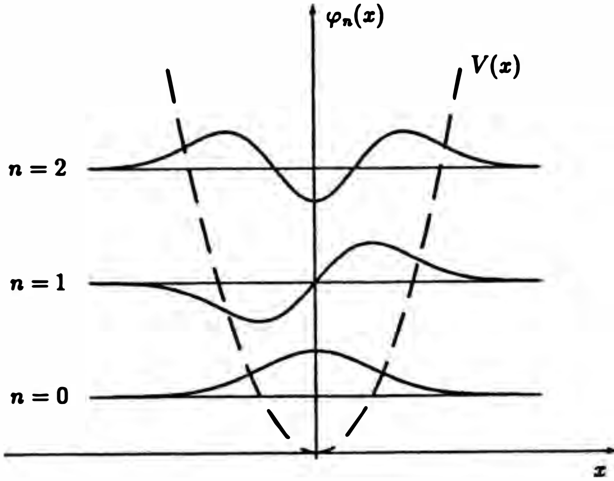
Ardından n = 2 olduğundaysa bir dalga fonksiyonum olur.

$$\phi_1 = const.e^{-x^2/2}\,(2x^2 - 1)$$

Bir de n sayısının 3 olduğu duruma bakalım:

$$\phi_3 = const.e^{-x^2/2}\,(2x^3 - 3)$$

**EINSTEIN:** Sanırım fonksiyonları eğriler halinde göstermek Mr. Newton'ın işini kolaylaştıracaktır. Bunun için fonksiyonları birer dalgaya dönüştürelim. Buna göre temel halin dalga fonksiyonu x ekseninde simetrik oluyor, birinci uyarılma hali asimetrik, bir sonrakiyse yine simetrik çıkıyor.

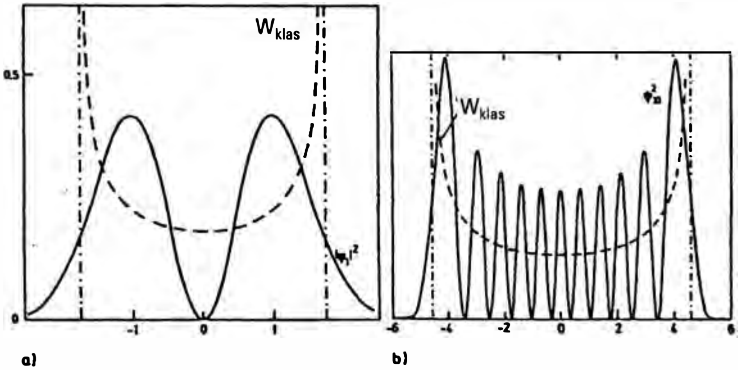



Osilatörün temel ve ilk iki halinin dalga fonksiyonu.

**FEYNMAN:** Salınan bir parçacığın, yani osilatörün bir yerde bulunma olasılığına bakalım. Klasik bir parçacıkta bu olasılığı vermek kolay. Tepe noktasında en az olacak, uçlara doğruysa sonsuza gidecektir. Şekilde kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Oysa n = 1 için kuantum mekaniksel dalga fonksiyonuna baktığımda, resimdeki iki tepe noktalı çizgiyi görürüm. Tam orta noktasında olasılık sıfırken, ardından iki pik oluşur ve üslü olarak yeniden sıfır noktasına gider.

Şimdi bunu bir de n = 10 haliyle karşılaştıralım. Bu örnekte dalga fonksiyonu on farklı sıfır noktasına sahiptir. Olasılığın ortalamasını aldığımızdaysa klasik olasılığın neredeyse aynına ulaşırız. Görüyorsunuz ya Mr. Newton, klasik fizik büyük n sayıları için ortalamada neredeyse daima aynı sonucu verir. Ancak küçük n sayılarında sapma oldukça büyüktür.

**NEWTON:** Özellikle temel halde bir tuhaflık dikkatimi çekiyor. En düşük haldeyken parçacığın dinlenme konumunda olması bekleneceğinden enerjisinin de sıfır olması gerekir. Ne var ki burada böyle bir şey söz konusu değil. Bu şekilde potansiyeli de çizdiniz. Görebildiğim kadarıyla burada parçacık klasik fiziğin yasak bölgesinde bulunabiliyor.

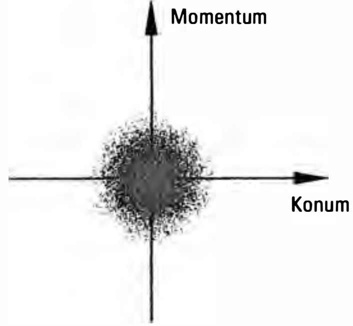



Osilatörün kuantum mekaniksel ve klasik bulunma olasılıklarının karşılaştırması.

**HEISENBERG:** Evet, kuantum mekaniğinde parçacık klasik fiziğin yasak bölgesinde de bulunabilir. Bu belirsizlik ilkesinin doğurduğu bir sonuçtur. Klasik fizikte en düşük enerji seviyesine parçacık dinlenme konumundayken ulaşılır. Kuantum kuramındaysa böyle bir hale izin verilmez, zira aksi halde benim belirsizlik ilkemle çelişir. Parçacık dinlenecek olursa, momentumu da tam o noktada sabitlenmiş sayılır ki, dediğim gibi bu belirsizlik ilkesine aykırıdır.

Temel halde, yani en düşük enerji seviyesinde parçacığın gerek momentumu gerekse konumu belirsiz olmalıdır ki belirsizlik ilkesiyle çelişmesin. Dolayısıyla temel halde dahi küçük bir hareket, bir tür titreşim olduğundan söz edebiliriz. Bunu enerjiye baktığımızda açıkça görebiliriz. Temel halde, yani $n = 0$ olduğunda enerji $h\omega/4\pi$' ye eşittir. Enerji hiçbir koşulda bunun altına düşemez. Klasik osilatör her türlü enerjiye sahip olabilirken, kuantum mekaniksel osilatörde sadece belli enerji değerleri mümkündür.

Diğer hallerin ne kadar yalın olduğunu görüyorsunuz. Haller arasındaki tüm enerji aralıkları eşittir: $E = h\omega/2\pi$, yani temel hal enerjisinin tam iki katı. Harmonik osilatör aslında son derece basit bir sistemdir. Enerji eşit aralıklarla büyür, tıpkı sonsuza uzanan bir merdivenin basamakları gibi.




Harmonik osilatörün temel halinde, belirsizlik ilkesi uyarınca parçacığın momentumu ve konumu belirsizdir.

Enerjinin özgül değerlerini veren formül şudur:

$$E_n = (n + \frac{1}{2})\, h\omega/2\pi$$

Parçacıkların klasik fiziğin yasak bölgesinde bulunabilme sorununa daha yüksek hallerde de rastlanır – dediğim gibi, bu da yine belirsizlik ilkesinin sonucudur.

Tekrar Schrödinger denklemine dönersek, osilatörün enerjisini bulmak için yararlandığımız formül şöyle olacaktır:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V$$

Burada kullanılacak Schrödinger denklemine daha yakından bakalım. Formülü şu şekilde ifade etmek mümkün:

$$E\psi = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi$$

Formülde m, parçacığın kütlesini, V ise parçacığın içinde hareket halinde bulunduğu potansiyeli ifade eder. Osilatörde V, x'in karesiyle orantılıdır.

Osilatör potansiyelindeki bir parçacığın klasik fiziğin yasak bölgesinde yer alabildiğini görmüştük. Bu yasak bölgeye giriş derinliğinin oldukça sığ olduğunu siz de fark etmişsinizdir. Olasılık, hızla azalan üslü bir çarpanla belirlenir.

Osilatör için söylediklerimiz, genel için de geçerlidir. Klasik fizikte parçacık bir potansiyel duvarını, ancak enerjisi bu duvardan daha yüksek olduğu durumlarda geçebilir. Ancak kuantum fiziğine göre, parçacığın enerjisi potansiyel duvarınınkinden az olduğunda da duvardan geçme olasılığı, düşük de olsa vardır. Parçacık potansiyel duvarı içinde kendine bir yol açtığı için buna tünelleme etkisi denir. Geçen gün sonsuz derinlikte potansiyel kuyusuna değinmiştik. Burada kuyunun çeperindeki dalga fonksiyonu tam olarak sıfır olmalıdır. Aynı zamanda yüksek enerjili ama sonlu bir potansiyel kuyusu da ele alabiliriz. Kuyunun derinliğine bağlı olarak asgari bir, ama çoğunlukla birden fazla çözüm vardır ve bunlar potansiyel duvarını aşmak suretiyle klasik fiziğin yasak bölgesine geçer. Giriş derinliği enerjiye bağlıdır ve her halükârda çok küçüktür.

**FEYNMAN:** Tünelleme etkisinin teknik uygulamasına dair bir not düşmek istiyorum. Varsayalım pozitif elektrik yüküne sahip, son derece sivri bir iğneyi negatif elektrik yüküne sahip bir metal yüzeye yaklaştırıyorsunuz. İğne yeterli mesafeye sahipse metal yüzeyle arasında elektriksel alan oluşur ama akım meydana gelmez. Ancak iğne yüzeye iyice yaklaştığında akım geçmeye başlar. Sebebini biliyor musunuz? Tünelleme etkisi bunu mümkün kılıyor.

Metal yüzeydeki elektronların bazıları iğneye ulaşmak için tünelleme etkisini kullanır. Klasik fizikte buna izin verilmese de kuantum mekaniğinde tünelleme mümkündür. Tünelleme sonucunda elektrik akımı meydana gelir, iğne metal yüzeyden biraz uzaklaştığındaysa akım kaybolur. Bu sayede tünelleme etkisi, iğnenin metalden ne uzaklıkta olduğunu kesin olarak söyleyebilir.

Bu etkiyi son derece ilginç uygulama alanlarında kullanmak mümkündür: İğneyle bir metalin yüzeyi, hem de atom düzeyinde ayrıntılı biçimde incelenebilir. Yüzey fiziği ve yüzey kimyası alanlarında bir numunenin yüzeyini görüntülemek için hidrojen atomu büyüklüğünde mesafeleri ölçebilen tünel mikroskobu kullanılır. Ölçüm işlemi için iletken bir iğne, incelenecek nesnenin yine iletken

yüzeyi üzerinde sistemli şekilde gezdirilir. Bu sırada iğneyle nesnenin yüzeyi elektriksel olarak temas etmemektedir. Aralarındaki yalıtkan malzeme nedeniyle makro düzeyde bakıldığında aralarında kesintisiz bir elektrik akımı oluşmaz aslında. Ama iğne yüzeye atom ölçeğinde yaklaştırıldığında, tünelleme etkisi nedeniyle elektron alışverişi, yani bir tünel akımı meydana gelir. Akımın yoğunluğu mesafenin negatif üssüne bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden akım, en küçük mesafe değişikliklerine bile tepki verecek hassasiyettedir.

Nesnenin yüzeyinin taranması sırasında iğnenin yüzeye olan mesafesi hassas bir mekanik düzenek yardımıyla, tüm hareket boyunca tünel akımı sabit kalacak şekilde ayarlanır. Bu sayede iğne ucu yüzeyin "yükselti profilini" takip eder ve elde edilen sinyal kullanılarak yüzeyin bir imgesi çıkarılır. Tünel mikroskobunun çalışma ilkesi, nesneyle iğne ucu arasında bir akım gerektirdiğinden, sadece iletken maddeler, örneğin metaller tünel mikroskobunda incelenebilir.

**HALLER**: Beyler, bugün bir arkadaşımla telefonda görüştüm. Kendisi Einstein'ın Potsdam Caputh'taki yazlık eviyle ilgileniyor. Yarından itibaren orada çalışabiliriz. Sevgili Herr Einstein, genel görelilik kuramı üzerine tartıştığımız günlerde orada beraber kalmıştık hatırlarsanız. Umarım yine oraya gidip konuğunuz olmamıza bir itirazınız yoktur.

**EINSTEIN**: Ne itirazım olsun? Aslında hazır Berlin'deyken neden kalkıp Caputh'a gitmiyoruz diye düşünsem de, burası pek rahat olduğundan kimseyi zora sokmak istememiştim. Ama eğer teklif sizden geliyorsa, ne duruyoruz! Berlin'e döndüğümden bu yana hiç Caputh'a gitmedim. Oraları yeniden görecek olmak beni fazlasıyla sevindiriyor.

Beş fizikçi otele dönüp valizlerini topladı ve taksiyle yola koyuldu. Kısa süre sonra önce Potsdam'a, oradan da Caputh'a vardılar. Bir saat sonra Am Waldrand Sokağı üzerindeki 15 numaralı evin önündeydiler. Einstein eski odasını tercih etti, diğerleriyse kalan iki odaya yerleşti. Haller ile Heisenberg bir odada, Newton'la Feynman ise diğerinde kalıyordu.

Akşam olmuştu. Bir restorana gitmek yerine Einstein'ın evinde yemeye karar verdiler. Einstein yakınlardaki bir süpermarketten ız-



Einstein'ın Caputh'taki yazlık evi.

gara için gerekli malzemeleri aldı. Sonra Einstein'ın terasında mangalda kuzu pişirip yanında bira içtiler ve yakınlardaki Schwielowsee Gölü'nü izlediler. Batan güneşin ışınları gölün yüzeyinde yansıyordu.

**EINSTEIN:** Burası ne kadar da güzel! Ne yazık ki bu evin keyfini sadece iki yıl sürebildim, zira 1932 sonbaharında Pasadena'ya gitmeliydim. Ertesi yılın ocak ayında Hitler denen o caninin Alman Reich Şansölyesi olması nedeniyle artık Berlin'e gelemezdim. Ben de Princeton'a gittim, ama aklım hep bu evdeydi. Günün birinde tekrar buraya dönmenin hayalini kurdum hep, ama hiç fırsat olmadı. Gerçi savaşın 1945'te bitmesiyle gelebilirdim, ama o zaman da ben istemedim.

**FEYNMAN:** Nasıl oldu da Almanya, Hitler gibi cani bir Avusturyalının aklına uydu? Almanya medeni bir ülkeydi. Neden böyle bir dönüşüm yaşadı ki?

**HEISENBERG:** Neden mi? Bu sorunun cevabını kimse bilmiyor. Hitler şansölye olduğunda derin bir ümitsizliğe kapılmıştım. Ben de başkalarının yaptığı gibi Almanya'dan ayrılabilirdim, ama ülkemi bu zor durumda terk etmek istemedim. Üstelik bütün bu kötü dönemin kısa sürede geçeceğine emindim, ama belli ki yanılmışım. Nasyonal sosyalizm felaketi tam on iki yıl sürdü. O zamanlar bana Columbia Üniversitesi tarafından teklif edilen kürsüyü kabul etmeliydim.

Tarih Auschwitz, Majdanek, Buchenwald gibi felaketleri daha önce hiç görmemişti. Ama siyaseti bir kenara bırakalım. Yine aramızda olduğunuz için çok mutluyum, Herr Einstein.

Fizikçiler daha uzun süre terasta zaman geçirdi. Siyaset, özellikle de Avrupa'daki yeni gelişmeler ve iki Almanya'nın 1990'daki birleşmesi hakkında uzun uzun konuştular.

# 6

# Hidrojen Atomu

Sabah herkes kahvaltı için terasta buluştu. Einstein zamanında Caputh'ta geçirdiği günlerini, yelkenlisiyle, çoğu zaman da yalnız göle açıldığını, spor yelkenciliği yapmadığı için de düşünmek için bol bol vakti olduğunu anlattı. Kahvaltının sonuna doğru Heisenberg sözü aldı.

**HEISENBERG**: Bugün kuantum fiziğinin en parlak başarılarından biri olan hidrojen atomuna geliyoruz. Öncelikle atomların bu en basitinin mekanik açıklamasının da son derece yalın olduğunu söylememe izin verin. Atom çekirdeğinin etrafında hareket eden bir elektron var. Salt klasik bakış açısıyla Sir Newton bu problemi kolayca çözecektir.

**NEWTON**: Hiç sorun değil. Tek bir protonun etrafında dönen elektronu ele alıyoruz. Bunun belli bir açısal momentumu, rasgele bir enerjisi vardır. Problem de böylelikle çözülmüş olur aslında. Elektron, protonun etrafında elips biçimli bir yörünge çizer, tıpkı dünyanın güneş etrafında dönmesi gibi. Kuantum mekaniğinin konuya nasıl yaklaştığını çok merak ediyorum doğrusu.

**HEISENBERG**: Şöyle: İsviçreli fizikçi Johann Jakob Balmer 1885 yılında sıcak bir hidrojen atomunun yaydığı ışığın dalga boyunun basit bir matematik formülüyle hesaplanabileceğini buldu:

$$\lambda = A\left(\frac{n^2}{n^2-4}\right)$$

Burada n doğal sayıdır.

Bu dalga boylarını nasıl anlamamız lazım? Bunun için bir kez daha Schrödinger denklemini kullanmamız gerekiyor. Bu denklem hidrojen atomu için nasıldır? Burada osilatör potansiyeli yerine, 1/r ile çarpılan bir sabit olarak tarif edilebilecek Coulomb potansiyeli kullanılır; buradaki r'nin elektronun çekirdeğe olan uzaklığını tarif ettiğini unutmayalım. Buradan elde edilen kuvvet, $1/r^2$ ile orantılıdır. Erwin Schrödinger tarafından bulunmuş denklemin çözümünü burada tüm ayrıntılarıyla anlatmama imkân yok. Zaten atomun sadece en düşük hallerine bakmak istiyoruz.

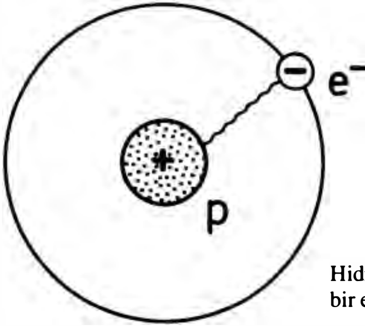
Öncelikle burada küresel simetrik bir sistemle çalıştığımızı unutmamamız lazım, zira protondan yayılan kuvvet her yönde eşittir. Bu sebeple elektronun açısal momentumu sabit bir büyüklüktür. Hatırlatmak isterim ki, açısal momentum dediğimiz, yarıçap ile impulsun vektör çarpımından başka bir şey değildir.

Kuantum mekaniğinde L açısal momentumu tam olarak 2L + 1 hale sahiptir ve bunlar m sayısı nedeniyle farklılık gösterir; buradaki m sayısı –L'den +L'ye uzanır, yani L = 1 için –1, 0, +1 ya da L = 2 için –2, –1, 0, +1, +2 vs. Burada m sayısı açısal momentumun z eksenine projeksiyonunu temsil eder. Adını da "manyetik kuantum sayısı" kavramından alır, zira manyetik alan içerisindeki bu kuantum sayısı ölçülebilir.

**NEWTON:** Doğru anlıyorsam açısal momentum da kuantumlanmış. Yani sadece ölçülü aralıklarda hareket edebiliyor, öyle mi?

**HEISENBERG:** Evet, her defasında ancak kati değerlere sahip olabilir. Açısal momentum bileşenlerine ayrılıp tıpkı klasik fizikteki gibi problem sadece tek boyuttaki hareketle çözülmeye çalışıldığında, elektriksel çekim kuvveti ve itme kuvvetinden müteşekkil bir kuvvetler yasası devreye girer; itme kuvveti ancak küçük mesafelerde etkili olan ve açısal momentumun korunumuyla meydana gelen merkezkaç kuvvetidir.

Bu problem çözüldüğünde ortaya şöyle bir tablo çıkar: Elektronun sabit bir enerjisi ve her enerji düzeyi içinse 2L + 1 hal vardır. Bu tuhaflık, tüm yönlere doğru eşit büyüklükte olan elektriksel kuvvetin simetrisinden kaynaklanır. 2L + 1 hallerinin tümü aynı açısal momentuma, ancak açısal momentumun –manyetik kuantum sayısı m tarafından verilen– üçüncü bileşeni için farklı kuantum sayılarına sahiptir. Manyetik alan içerisinde bu haller ayrılır. Enerji radyal ku-



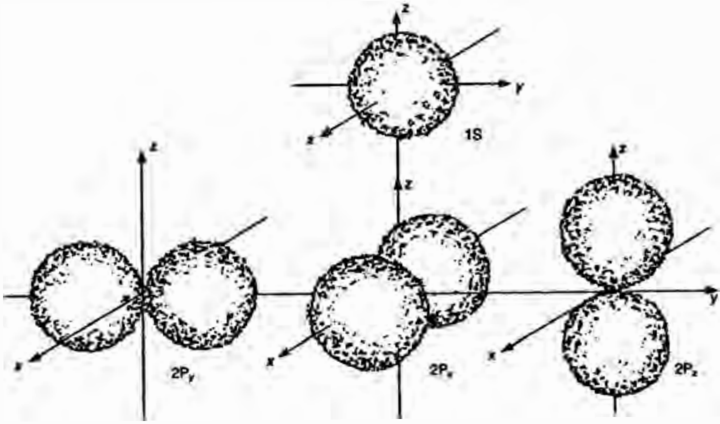

Hidrojen atomu bir proton ve bir elektrondan meydana gelir.

antum sayısı n tarafından belirlenir. Bu konuya hemen döneceğim. L açısal momentumu açısal momentumun sıfır olduğu noktada, yani 0'da başlıyor, ardından bunu 1, 2 vb. izliyor.

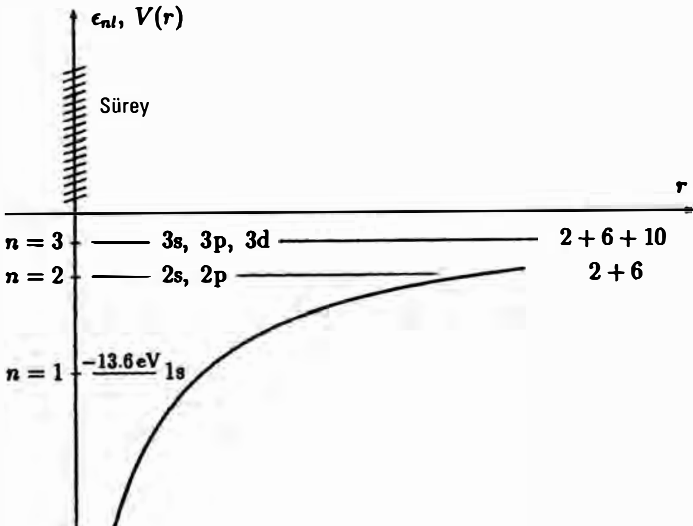
Atom fizikçilerinin kullandıkları dile ilişkin bir not eklemek istiyorum. Açısal momentumun 0 olması, halin tamamiyle küresel simetrik olduğu anlamına gelir ve bu duruma s-dalgası adı verilir. Açısal momentumun 1 olması p-dalgası, 2 olması d-dalgası, 3 olmasıysa f-dalgası olarak adlandırılır vesaire. s-hali hariç tüm hallerde, hiçbir elektronun bulunmadığı yönler vardır, çünkü buralarda dalga fonksiyonu kaybolur.

En düşük enerji seviyesine sahip temel halde, dalga fonksiyonu tamamen küresel simetriktir, yani belli bir noktada elektron bulunma olasılığı sadece çekirdeğe olan mesafeye bağlıdır. En büyük olasılığa çekirdekten santimetrenin beş milyarda biri uzaklıkta rastlanır. Bir elektrona atomun merkezinde, yani protonda rastlama olasılığı da vardır. Klasik fizikte böyle bir şey mümkün değilken, kuantum mekaniği bunu mümkün kılar.

Açısal momentumu bir kenara bırakacak olursak Schrödinger denklemi, sıfır noktasına olan mesafeyi belirten r koordinatının diferansiyel denklemine indirgenir. Bu denklem, n kuantum sayısı ancak tamsayılı değerler aldığında (n = 1, n = 2) gibi çözülebilir. Her bir n değeri için L açısal momentumu 0, 1, 2... n – 1 değerlerini alabilir; örneğin n = 3 için L = 0, L = 1, L = 2. Bu hallerin hepsi aynı enerjiye sahiptir. Görülen o ki, belli bir enerji için bir dizi hal söz konusu. Enerji n ile tarif edilmişse, bu durumda $2(n-1)^2$ kadar hal vardır. Dolayısıyla n = 3 için toplam 8 hal söz konusudur: $8 = 2\,(3-1)^2$.




Hidrojen atomundaki elektronun halleri. Temel hal olan 1S küresel simetriktir ve açısal momentumu sıfıra eşittir. Aynı enerji ve L = 1 açısal momentumuna sahip üç adet 2P hali vardır. Bu hallerde bir elektron bulma olasılığı yöne bağlıdır.




Hidrojen atomunun ilk enerji değerleri.

**FEYNMAN:** Sözünüze devam etmeden önce Bohr kuantumlama koşulunu hatırlatmak isterim. Bohr bu problemi, impulsla yarıçapı çarptığında çıkan tamsayılı sonucu h ile çarpıp 2π'ye bölmek suretiyle çözmüştü. Bohr'un şansının da yaver gittiğini söylemek gerek, çünkü bu formül hidrojen atomu için kesin olarak geçerli olmakla beraber, bunun sebebi kuvvet yasasının simetrisinin son derece yüksek olmasıydı. Bu sayede n'inci halin çapı için en düşük halin çapının $n^2$ katını elde etti. Son derece basit bir sonuç. İlgili enerjiyse, en düşük halin enerjisinin $1/n^2$ katıyla bulunur. Bunu hesaplamak mümkün olduğundan, Bohr gözlemlediği Balmer serisi gibi hidrojen serileri için doğru formülü bulmuş oldu. Schrödinger denkleminden yola çıkarak Bohr yöntemine de ulaşılabilir.

**NEWTON:** Schrödinger denkleminin tam çözümünü merak ediyorum. Basit haller bu denkleme göre nasıl görünür?

**HEISENBERG:** Epey şaşıracaksınız, Sir Newton, çünkü yarıçapla ilgili dalga fonksiyonları son derece yalın. S-dalgası, Bohr yarıçapına bölünen yarıçapın fonksiyonudur; buradaki Bohr yarıçapı Planck sabiti ve kuvvet şiddetinden elde edilir. Sayısal olarak Bohr yarıçapı $0{,}529 \cdot 10^{-10}$'dur.

S-halinin dalga fonksiyonu da son derece basit. $\psi = const. \cdot e^{-r}$. Görüyorsunuz bizim İhtiyar işini kolayca halletmiş. Çözüm üslü çıkıyor.

Aynı açısal momentuma, yani 0 değerine sahip bir sonraki hal yine bir s-halidir, ama şimdi denklemde bir de 0 vardır. Dalga fonksiyonu $(1 - r/2)e^{-r/2}$ ile orantılıdır.

Başlamışken bir de p-dalga fonksiyonundan, 2p halinden söz etmek istiyorum. Bu da $re^{-r/2}$ ile orantılıdır.

Şimdi dalga fonksiyonlarına yakından baktığımızda başka bir güzel nokta dikkat çeker. Bohr bu yalın yöntemle n kuantum sayısına sahip halin yarıçapının, $n^2$ ile Bohr yarıçapının çarpımı sonucu elde edildiğini bulmuştu. Dağınık dalga fonksiyonlarında bunu tespit etmeye çalışmak anlamsız olacaktır, zira burada yörüngeler yoktur; ama azami yarıçap olasılığı hesaplandığında, Bohr'un vardığı sonuca ulaşılır: Bohr yarıçapının $n^2$ katı.

**NEWTON:** Bohr'un şansı gerçekten de yaver gitmiş. Uyguladığı yöntem hidrojen atomu için tutarlı sonuç vermiş. Ama başka bir atom da kullanabilirdi, gerçi o zaman da çalışmaları yakın bir sonuç verirdi

ama kati sonuçlar değil. Potansiyel 1/r ile orantılı değil de başka bir şey olsaydı, Bohr, Schrödinger denklemiyle ulaşılan sonuca varamazdı.

**HEISENBERG**: Aynen öyle. Bir başka konuyu da dile getirmek gerekir. Açısal momentum L en fazla n – 1 büyüklüğünde olabilir, yani radyal kuantum sayısı eksi 1. Tam olarak n – 1 çıktığında –klasik tabirler kullanacak olursam– dairesel, küçük olduğundaysa eliptik bir yörüngesi olur. Temel hal için n = 1, dolayısıyla L'nin 0 olması gerekir, bu da dairesel yörüngeye tekabül eder. Dolayısıyla temel hallerde eliptik yörüngelere rastlanmayacağı sonucuna ulaşabiliriz. Öte yandan n = 2 olduğunda, L = 0 ve L = 1 çıkar, ki bu durumda ilkinde daire, ikincisindeyse elips biçimli bir yörünge oluşur.

**NEWTON**: Yavaş yavaş aklıma yatmaya başladı. Bohr'un görüşü, elektronların belli yörüngeler üzerinde hareket ettiklerini varsaydığı için yanlış. Elektronlar birer dalga ve bu dalgaları titreşimler olarak da yorumlamak mümkün. Her titreşimin kendine özgü bir frekansı, dolayısıyla bir enerjisi var. Yani hidrojen atomundaki elektron, net olarak belirlenmiş, tanımlı hareket modlarına sahip.

Elektronun dalga doğasıyla atom içinde kati hallerin bulunması arasında doğrudan bir bağlantı var. Atom, halini kesintisiz olarak değiştiremez, bir halden diğerine atlaması gerekir.

**HEISENBERG**: Evet. Schrödinger o zamanlar hidrojen atomundaki titreşim hallerini hesapladığında, bunların frekansının, yani enerjisinin, gözlemlemiş olduğu enerjilerle tam olarak örtüştüğünü gördü. Bu olağanüstü bir keşifti.

Tayf çizgilerinde rastlanan serilerden, örneğin Balmer serisinden bahsetmek istiyorum. Schrödinger enerji farklarını hesapladı ve ışığın dalga boyu için şu sonuca ulaştı:

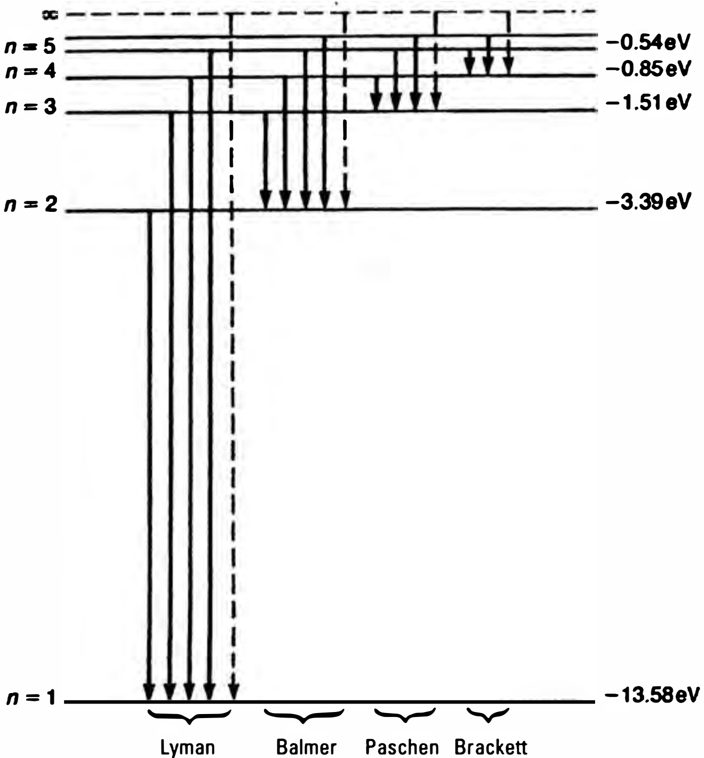
$$\frac{1}{h} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Burada R ile gösterilen Rydberg sabitidir ve 10.973.731,568527 (73) $m^{-1}$ olarak ölçülmüştür.

Buradaki $n_f$ ve $n_i$ sayıları, son ve başlangıç hallerinin kuantum sayılarıdır. Balmer formülü, $n_f^2 = 4$ durumları için geçerlidir. Bu formül, elektronların n = 2 hallerine sıçramalarını açıklar.

Temel hale sıçramalar henüz bilinmemekteydi. Bunun sebebi de aşikâr. Temel hale sıçrarken yayılan fotonlar çok yüksek enerjiye sahip olduklarından bunları görmek mümkün değildir. Tayf çizgileri tayfın morötesi kısmında yer alır. Bu çizgilere Lyman serisi adı verilir.

Paschen ve Brackett serileriyse tayfın kızılötesi kısmına konumlanmıştır ve n = 3 ve n = 4 hallerine sıçrayan elektronlardan kaynaklanırlar.




Hidrojen atomunun enerji seviyeleri. Lyman, Balmer, Paschen ve Brackett serileri olarak sınıflandırılmış çeşitli tayf çizgileri de gösterilmiştir. Her bir dizinin nasıl meydana geldiği de görülmektedir. Görülebilir aralıkta fotonlar sadece n = 2 haline sıçrayan elektronları tarif eden Balmer serisince üretilir.

**FEYNMAN:** Kuantum kuramı sayesinde geceleri gökyüzünde görülen bulutsuların, örneğin Orion (Avcı) nebulasının renklerinin sebebini de anlayabiliriz. Nebulalar içinde çok sayıda sıcak yıldız vardır ve bunlar enerji yüklü morötesi fotonlar yayar. Bu fotonlar hidrojen içindeki elektronları dışarı atar ve geriye proton ve elektronlar kalır. Bu yapıtaşları tekrar birleşirken elektronlar, en temel hale ulaşmak için sırayla diğer halleri ziyaret ederler. Orion nebulasının kırmızımsı rengi, n = 3 halindeki elektronların n = 2 haline geçmeleriyle meydana gelir.

**HEISENBERG:** Molekül ve kristallerin sahip oldukları düzen de kuantum mekaniğinden kaynaklanmakta. Yaşadığımız dünyanın biçimi ve yapıları, örneğin bir kar kristalinin altıgen yapısı ya da çiçeklerin sahip oldukları simetrinin sebebi hep atomların tabi olduğu basit yasalardır. Her çiçek, aynı türden olması koşuluyla bir diğerinin aynısı yapıya sahiptir. Bunun sebebi, her bir hidrojen atomunun bir diğer hidrojen atomuna benzemesidir – hepsi de birbirinin aynıdır. Tüm evreni oluşturan karakteristik yapıları da kuantum mekaniği açıklayabilir. Kuantum fiziği olmaksızın dünyada kati yapılar olamazdı. Herşey belirsiz, yaşamsa imkânsız olurdu.

Atomların kararlı hallerinin açıklaması da kuantum mekaniğinde yatar. Temel halden bir sonraki hale geçmek için bir hidrojen atomuna en az 10 elektronvoltluk bir enerji uygulanması gerekir, aksi halde atom temel halinde kalmayı sürdürür. Normal oda sıcaklığında atom başına termik enerji yaklaşık olarak 1/40 eV'dir. Dolayısıyla oda koşullarında tüm hidrojen atomları temel halde kalır.

**NEWTON:** Peki gazlar neden şeffaf? Yani ışık geçirgenliklerinin sebebi nedir?

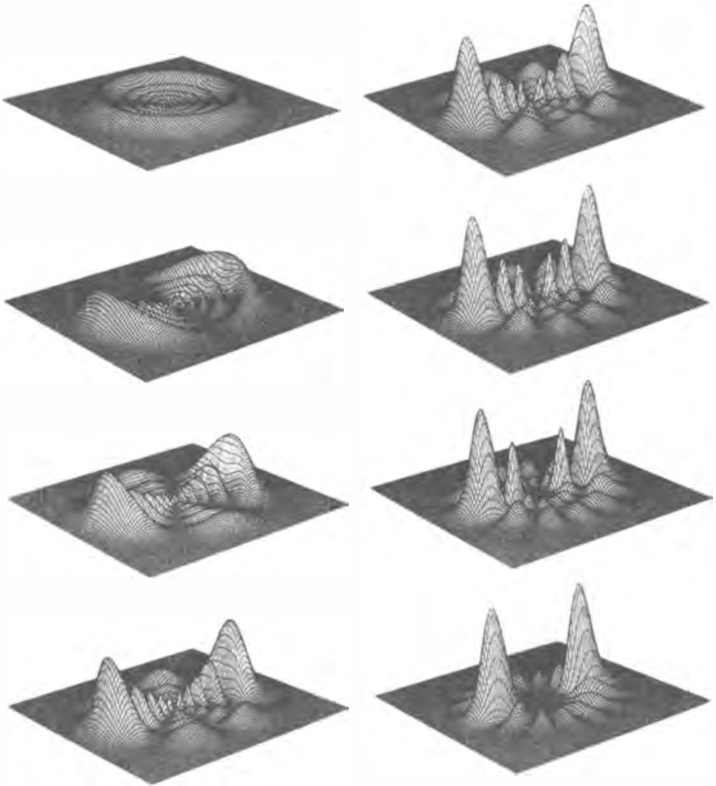
**FEYNMAN:** Oda sıcaklığında çoğu gazın atomları temel hallerindedir. Temel halle ilk uyarılma hali arasındaki enerji farkı son derece yüksektir ve sadece morötesi fotonlar geçiş yapabilir. Bu sebeple görülebilir aralıktaki ışık, bir gazın içinden engellenmeden geçebilir. Bu esnada atomlar ışık tarafından uyarılmaz.

**NEWTON:** Hidrojen atomunun bir proton ve bir elektrondan meydana geldiğini biliyoruz. Peki bu ikisini birbirinden ayırmak için ne kadar enerji gerekir?

**HALLER:** Dinlenme konumunda bir proton ve elektronun enerjisini sıfıra ayarlayacak olursak, hidrojenin temel halde sahip olduğu enerji

–13,6 eV'dir. Pek fazla değil. Atomların bağı bu nedenle o kadar kuvvetli değildir. Elektronları çıkarmak, yani iyonize etmek son derece kolaydır.

**EINSTEIN:** Hidrojenin merkezindeki protonun noktasal olmadığını, atomun genişliğinin yüz binde biri ölçeğinde olsa da bir genişliği olduğunu biliyoruz. Yani atom fiziğindeki denklemlerin değişmesi gerekecek. Bu değişiklikler büyük mü olacak?



n = 8 haline sahip bir hidrojen atomunun resmi; dizi, sol üstte l = 0 ile başlayıp sağ altta l = 7 ile sona eriyor.

**HALLER:** Hayır, bunlar gözardı edilebilecek kadar küçük değişiklikler. Basit tahminlerden yola çıkarak bu etkinin, noktasal protonlar için elde edilen enerjinin yaklaşık milyarda biri kadar olduğu söylenebilir. Dolayısıyla herhangi bir sorun teşkil etmiyorlar.

**NEWTON:** Hidrojen atomunu gezegenler sistemiyle karşılaştırabiliriz; tek fark elektron yörüngelerinin ölçülü aralıklara sahip, yani kuantumlanmış olması. Ama yine de uzaklardan gelip güneş sistemimizi şöyle bir ziyaret ettikten sonra yeniden gözden kaybolan gökcisimleri var. Bunlara kuyrukluyıldız diyoruz. Hidrojen atomunda da buna benzer olgular var mı?

**FEYNMAN:** Evet, böyle hallerle de karşılaşılabiliyor, ama artık bunlara atom adını vermek doğru olmaz. Bunlar, bir protonun yanından geçerken onun elektriksel yükü nedeniyle yolundan saptırılan elektronlar. Sapmanın ardından elektron tekrar uzaklaşır. Böyle bir durumda elektron için belirli bir enerji zorunluluğu yoktur, herhangi bir enerjiye sahip olabilirler.

Size n = 8 haline sahip, yani son derece yüksek bir uyarılma durumundayken hidrojen atomunun bir resmini göstermek istiyorum. Sol üstte açısal momentumun l = 0 olduğu hali görüyoruz. Simetrik bir hal olduğu için üç boyutta küresel simetriye sahip. Bunun altında l = 1 hali var ve simetri bozulmuş. Daha yüksek açısal momentuma doğru ilerledikçe simetrinin daha da çarpıklaştığı göze çarpıyor. Bu haller l = 2, 3 vb. diye sağ alttaki l = 7'ye kadar devam ediyor. Şimdi hal, iki ayrı merkez meydana getirmiş durumda.

**HALLER:** Beyler, saat on ikiye gelmek üzere. Caputh'ta güzel bir restorana gitmeye ne dersiniz?

Öğle yemeği için, balığını yakınlardaki Schwielowsee Gölü'nden çıkaran Fährhaus'a gittiler. Restoranın menüsünde Unstrut bölgesinden harika şaraplar da olduğundan, beş fizikçi toplam altı şişe bitirdi. Çakırkeyif vaziyette Einstein'ın evine döndüler ve öğleden sonrasını fiziğe ayırmak yerine yakınlardaki korulukta yürüyüşe çıkmaya karar verdiler.

# 7

# Yeni Bir Kuantum Sayısı: Spin

Ertesi sabah terasta yaptıkları kahvaltının ardından Newton hızla tartışmaya döndü.

**NEWTON:** Geçenlerde elektronların tuhaf bir kuantum sayısına sahip olduğu söylenmişti; bir tür öznel impuls olan spinden bahsedildi. Bana tuhaf gelmesinin nedeni, genişliği olmayan noktasal bir parçacık olan elektronun nasıl öznel bir impulsa sahip olabileceğini tam kestirememem. Nedir bu spin denen şey, Herr Heisenberg?
**HEISENBERG:** Haklısınız, spin gerçekten de tuhaf bir kuantum sayısı. Herşey yine bir deneyle başladı. Otto Stern ve Walther Gerlach 1922 yılında ilginç bir deneye giriştiler. Gümüş atomlarından müteşekkil bir ışını homojen olmayan bir manyetik alana yönelttiklerinde, diğer taraftan iki ışının çıktığını gördüler. Atom ışını ikiye ayrılmıştı. Gümüş atomlarının en dış yörüngelerinde tek elektron vardır, bu yüzden Stern'le Gerlach bu deneyleriyle elektron davranışını etüt edebildi. Gümüş atomu yerine sadece elektron kullansalardı da sonuç benzer olurdu.
**NEWTON:** Deney bize elektronların, daha önce düşünülmemiş bir başka özellikleri olması gerektiğini göstermiyor mu? Elektronlar herhangi bir yapı arz etmeyen asgari büyüklükteki kütle noktacıklarıysa, oluşturdukları ışının ikiye ayrılmaması gerekir.
**HEISENBERG:** Tahmininizde haklısınız. Bu deneyin bize düşündürdükleri, Wolfgang Pauli'nin yeni bir fikriyle yakından alakalıydı. Pauli elektronun, iki rakamla belirtilen başka bir kuantum sayısına sahip olması gerektiğini ileri sürdü. Bu sayıyla atomların elektron

kabuğunu tarif etmek mümkün olacaktı. Pauli'nin o zaman ne olduğunu henüz bilmediği bu kuantum sayısına sonra yine değineceğiz. 1925 yılında Samuel A. Goudsmit ve George E. Uhlenbeck her elektronun kendine has bir açısal momentumu olduğunu, bunun da aşağıdaki formülle bulunabileceğini iddia ettiler.

$$\frac{1}{2} = (h/2\pi)$$

Burada h Planck sabitidir. İkili bu açısal momentuma spin adını verdi. Pauli bu gelişmeyi fark etmiş ve kendi bulduğu yeni kuantum sayısının spin olduğuna hükmetmişti. Ne var ki bunun Goudsmit ve Uhlenbeck'in ileri sürdüğü gibi bir açısal momentum, yani elektronun bir eksen etrafındaki dönüşüyle ilgisi olamayacağının farkındaydı. Daha ziyade elektronun içsel bir kuantum özelliği, salt kuantum etkisi olmalıydı. Pauli böyle bir etkinin varlığını varsaymış, bir anlamda hayal gücüne açık çek yazmıştı. Öte yandan bunun ne olduğuna dair hiçbir fikri olmadığını, bu konuda akıl yürütmeye de yanaşmadığını söylemişti. Daha sonra matematikçiler Pauli'nin ileri sürdüğü bu fikri grup kuramı yardımıyla temellendirmeyi ve somut bir tablo ortaya koymayı başardı.

Örneğin $s = {}^1/_2$ spine sahip bir elektronu gözlemlediğimizi düşünelim (Planck sabiti 1 alınmıştır). Burada s'nin karesini de hesaplayabiliriz; tıpkı açısal momentumda olduğu gibi ${}^1/_2 \times {}^3/_2 = {}^3/_4$.

**NEWTON:** Dolayısıyla bir elektron iki halde olabilir: ya $+ {}^1/_2$ ya da $- {}^1/_2$ spine sahip halde.

**HEISENBERG:** Evet. Her iki hali de şu şekilde ifade edebiliriz.

$$\left\| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right> \quad \text{ve} \quad \left\| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right>$$

Spinin üç bileşeni, yani x, y ve z yönlerindeki spin matris şeklinde yazılabilir.

Bunun için, $\vec{s} = \frac{1}{2} \vec{\sigma}$ yazılır.

Buradaki üç spin matrisi de, Pauli'nin adıyla anılan basit matrislerden meydana gelir:

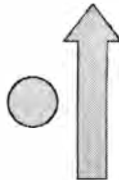
$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$$

Bu matrislerin iki tanesi birbiriyle çarpılır, sonra matrislerin yeri değiştirilip bir daha çarpılır ve iki sonucun farkı birbirinden çıkarılırsa açısal momentum için elde edilen sonuca varılır. Buna komütatör adı verilir.

$$S_i S_j - S_j S_i = i\varepsilon_{ijk} S_k$$

Bu sayede bir elektron iki sayıyı belirtmek suretiyle tarif edilir, zira Pauli matrislerinin iki satırı, iki de sütunu vardır. Buna Pauli spinörü de denir. Pauli'ye göre elektronun spini $^1/_2 h$, yani yarım sayıdır ve Planck sabitini sıfır kabul ettiğimizde yutulur. Dolayısıyla spin salt kuantum mekaniksel bir etkidir. Klasik fizikte spinin yeri yoktur. Elektronlar, biri impulsu diğeriyse spini gösteren iki okla tarif edilir. Elektron dinlenme halindeyken de hâlâ iki hal söz konusudur – biri [$^1/_2$, + $^1/_2$] dalga fonksiyonuyla gösterilen yukarı spin, diğeriyse [$^1/_2$ – $^1/_2$] denkleminin tarif ettiği aşağı spin. Burada ilk sayı spini, ikincisiyse spinin z ekseni yönünde yaptığı üçüncü hareket bileşenini verir.

**HALLER:** Lineer bir kombinasyon, yani a [$^1/_2$, + $^1/_2$] + b [$^1/_2$, – $^1/_2$] aracılığıyla herhangi bir hali tanımlamanın mümkün olduğunu eklemek isterim; burada $a \text{x} a + b \text{x} b = 1$ olmak kaydıyla a ve b sayıları kompleks sayılardır. Bu durumda spinin yukarı olduğu kadar aşağı olma olasılığı da vardır. a ile b sayıları $1/\sqrt{2}$'ye eşit olduğunda, bu halin yukarı spinli olma olasılığı yüzde 50'dir. Aşağı spinli olma olasılığı da aynıdır.



Yukarı spinli bir elektron.

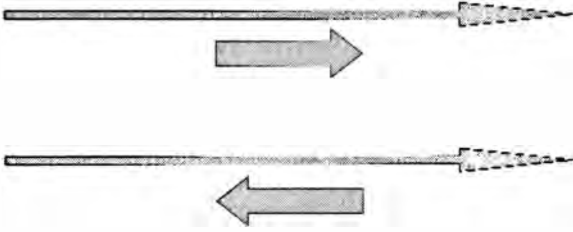


Kuantum mekaniğinin öncülerinden Wolfgang Pauli.

**NEWTON:** Gerçekten pek tuhaf şu kuantum mekaniği. Kesin olan hiçbir şey yok, her şey belli olasılıklar dahilinde gerçek. Elektronun spini yüzde 50 ihtimalle aşağı doğru olabilir, yüzde 50 ihtimalleyse yukarı doğru – şu elektron ne acayip parçacıkmış! Anlaşılan ne istediğini kendisi bile bilmiyor.

**EINSTEIN:** Yüce Tanrımızın belirsizlikler içinde, kumarhanedeki bir bahisçi gibi durmadan zar atmasından ben de hoşnut değilim. Kuantum mekaniğinin gerçek cevapları ortaya çıkaramayacağı konusundaki görüşlerimde ısrarcıyım. Bana sorarsanız şans oyunlarına meraklı insanların faydalanacağı bir bilim olabilir ancak, ruletin bilimi, siz de, Herr Heisenberg, rulet masasının krupiyesisiniz. Neden bir kumarhanede iş aramıyorsunuz? Bence ideal mesleği seçmiş olurdunuz.

**HEISENBERG:** Rica ediyorum, Herr Einstein, hayatımda kumarhaneye adım atmadım, bir kez olsun şans oyunu oynamadım ve bana sorarsanız krupiyelik pek gıpta edilecek bir meslek değil açıkçası. Benim niyetim evreni anlamak. Burada konumuz yüce Tanrımız değil, doğanın ta kendisi ve şahsen doğanın, en azından mikrofizik düzeyinde belirsizlik arz etmesine hiçbir itirazım olmaz. Düşünecek olursanız, mikro düzeydeki fiziği klasik fizikte sahip olduğumuz kaba kavramlarla tarif ediyoruz. Bunun mümkün olması şaşırtıcı ve ne yazık ki karşılığında bir feragatte bulunmamız gerekiyor, o da belirsizlik.



Elektronları biri impuls, diğeriyse spini tarif etmeye yarayan iki okla tanımlamak mümkün. İmpulsla spin aynı yöndeyse sağ spinli elektrondan, ters yöndelerse sol spinli elektrondan söz ederiz.

**FEYNMAN:** Beyler, isterseniz felsefeyi bir kenara bırakalım ve fiziğe, elektronlara, yani gerçek dünyaya dönelim. Stern ve Garlach'ın deneyi elektronların bir tür içsel açısal momentuma, diğer bir deyişle spine sahip olmaları gerektiğine işaret eder; bu spin elektronlarda bir de manyetik momente sebep olur. En azından Goudsmit'le Uhlenbeck'in 1925 yılında Pauli'ye dayanarak vardıkları yoruma göre deneyin sonucu buydu. Bu sayede Stern-Garlach deneyini gerçekçi biçimde açıklayabildiler. Işının yarılmasının nedeni, ışınlardan birindeki elektronların spinin yukarı, diğerindekilerinse aşağı olmasıydı.

Elektronların spini atom fiziği açısından da çok önemlidir. Hidrojen atomuna daha yakından bakalım şimdi. Gerek atom kabuğundaki elektron, gerekse çekirdekteki proton spin sahibidir. Hidrojen atomundaki spinler aynı yönde de olabilir zıt yönde de.

**NEWTON:** Ama bunlar son derece istisnai durumlar olsa gerek. Normal koşullar altında spinler herhangi bir yönde olabilir, elektron spini yukarı doğruyken, proton spini örneğin yana doğru bakabilir.

**HEISENBERG:** Haklı olmasına haklısınız, Sir Isaac, ama şunu unutmayın: Spin herhangi bir yönde olabilir, ancak bu yön, bazı katsayıların da dahil olduğu iki ihtimalden, yani aşağı spin ve yukarı spinden meydana gelir. Dolayısıyla kuantum kuramında, yukarıda saydığım iki ihtimali incelemek yeterli.

**NEWTON:** Pekâlâ, kuantum fiziğinin tüm tuhaflıkları düşünüldüğünde bu da mümkün olsa gerek. Dolayısıyla şu anda elimizde iki ihti-

mal var: Spinler ya paraleldir ya da ters-paralel. Peki enerjileri nasıl? Enerji de spinlere mi bağlı?

**FEYNMAN:** Evet, iki spinin de küçük manyetik momentler olarak davrandığı tespit edildi. Spinlerin paralel olduklarındaki enerjileri, ters-paralel hallerindekinden biraz daha büyük olsa da bu fark son derece küçüktür. Buna hiper hassas geçiş adı verilir. Aradaki bu enerji farkı nedeniyle, hiper hassas yarılmayla birbirinden ayrılan iki hidrojen atomu meydana gelir.

**HALLER:** Bu geçişin aynı zamanda 21 santimetrelik dalga boyuna sahip özel bir ışık yaydığını da eklemek isterim.

Mikrodalga aralığında yer alan bu elektromanyetik ışıma radyo astronomları için büyük öneme sahip. Neden mi? Evrende en bol rastlanan element hidrojendir. Sadece yıldızlar değil, evrendeki çoğu gaz bulutu da ağırlıklı olarak hidrojenden müteşekkildir. Bu gaz bulutları radyo teleskoplarla gözlemlenebilir, çünkü hidrojen gazı 21 santimetrelik dalga boyunda radyo dalgaları yayar, zira hidrojen atomları, yukarıda bahsettiğimiz bu iki hal arasında sürekli gider gelir. Nitekim bu ışıma sayesinde evren hakkında çok ayrıntılı bilgiler edinebildik.

**HEISENBERG:** Atom fiziğine bir de farklı bir açıdan bakalım. Helyum atomunu ele alacak olursak, bunun çekirdeğinde iki proton olduğunu görürüz. Protonlar güçlü çekirdek etkileşimi tarafından bir arada tutulur. Bu etkileşim için iki de nötrona ihtiyaç vardır, zira proton sayısı ikiye çıktığında, çekirdeği bir arada tutmaya yarayan güçlü etkileşim, iki protonun elektriksel itme kuvvetini aşacak güçte değildir. Dolayısıyla çekirdeğin yapısına iki de nötron eklenir ve (ppnn) biçimini alır.

Çekirdeğin kendi hareketini gözardı edersek, elimizde iki elektron için kullanacağımız Schrödinger denklemi ve elektronların elektrostatik itme kuvvetini tarif eden yeni bir kavram var. İkincisini şimdilik bir kenara bırakalım. Bu durumda helyum atomunun dalga fonksiyonu, elektronların iki dalga fonksiyonundan meydana gelir; bunlar her bir elektron için farklı ya da aynı olabilecek n, l ve m kuantum sayılarıyla tarif edilir.

Örnek olarak temel hali inceleyelim. Burada her bir elektron için $n = 1$, $l = 0$ ve $m = 0$ çıkar. Spinler de birbirinin aksi yöndedir. İleri-

de bu anlattığımın Pauli ilkesiyle alakalı olduğunu göreceğiz. Şu anda tarif ettiğimiz helyum atomuna parahelyum adı verilir.

Artık parahelyumun bağlanma enerjisini hesaplayabiliriz; bu enerji, hidrojen atomunun sekiz katıdır. Dörtle çarpılmasının nedeni, çekirdek yükünün hidrojenin iki katı, bağlanma enerjisinin çekirdek yükünün karesi olması ve son olarak da –iki elektron söz konusu olduğundan– tekrar ikiyle çarpılması. Hidrojen atomunun bağlanma enerjisi de 13,6 eV olduğuna göre helyumun bağlanma enerjisi 8 x 13,6 = 108,8 eV olarak bulunur. Deneylerde bağlanma enerjisi 78 eV olarak çıkar. İki sonuç arasındaki fark, yukarıda gözardı ettiğimiz iki elektronun elektrostatik itme kuvvetinden kaynaklanır. Parahelyumun yanı sıra bir de ortohelyum vardır. Bunda iki spin aynı yönlü, elektronların spin dalga fonksiyonları simetriktir.

**NEWTON:** Schrödinger denklemi, spinin başta hiç yer almadığı bir denklem. Şimdi elimde spini olan bir parçacık varsa, bunu da Schrödinger denklemiyle tarif etmem mümkün mü, yoksa başka bir denkleme mi ihtiyaç var?

**HEISENBERG:** Sevgili Sir Newton, gerçekten hassas bir noktaya parmak bastınız. Gerçekten de başka bir denklem var bu iş için. Üstelik yurttaşınız olan Paul Dirac tarafından, geçtiğimiz yüzyılın yirmili yıllarının başında geliştirildi. Ünlü Dirac denklemi. Buna gelmeden önce öğle olduğunu hatırlatmak isterim. Yemeğe mi gitsek, ne dersiniz?

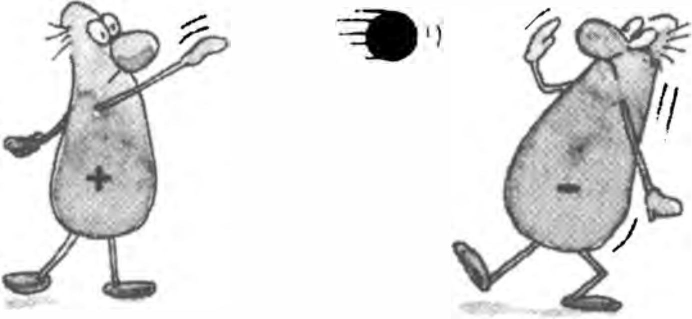
**EINSTEIN:** Hayır. Bugün restorana gitmeyeceğiz. Mangal için et aldım, şarap deseniz kilerde bolca var. Bence bugün bahçede yiyelim. Zaten size sormadan mangalı yaktım bile.

# 8

## Kuvvetler ve Parçacıklar

Yemeğin akabinde beş fizikçi korulukta iki saatlik bir yürüyüşe çıktı. Yeniden terastaki yerlerine kurulduklarında saat epey ilerlemişti. Yine de kahvelerinin ardından tartışmaya kaldıkları yerden devam etmeye karar verdiler.

**HEISENBERG:** Klasik fizikte örneğin bir demir parçası gibi bir madde ve elektriksel ya da manyetik kuvvet gibi kuvvetler vardır. Kuantum kuramıysa bu sorunsalı bambaşka bir bakış açısıyla irdeler. 1930'lu yıllarda, kuvvetlerin de tıpkı madde gibi aslında parçacıklarla ilgili olduğunu Wolfgang Pauli'yle birlikte buldum. Bu sizi şaşırtabilir Mr. Newton ama aslında anlaşılması son derece kolay. Örneğin elektriksel kuvvet ya da daha geniş anlamıyla tüm elektromanyetik kuvvetler, ilgili parçacıklar arasında gidip gelen fotonlarca taşınır.
**NEWTON:** Böyle bir şey nasıl olur? O zaman gerçekte sadece maddenin, yani sadece parçacıkların var olduğu, herhangi bir özel kuvvetin bulunmadığı sonucuna varırız; yanlış anlamayın, bu benim fevkalade hoşuma gider. Böylece evreni anlamak biraz daha kolaylaşır. Yani hem madde hem de kuvvet parçacıkları var ve her ikisi tek bir birim kabul edilebilir, öyle mi?
**HEISENBERG:** Evet, böyle ifade edersek evrende sadece madde olduğunu söyleyebiliriz. Kuantum fiziğinde bir kuvvet nasıl meydana gelir? İsterseniz klasik fizikten bir örnekten faydalanalım. Birbirine yakın duran iki kayık düşünün. Kayıklardan birindeki şahıs elindeki topu diğer kayıktakine atsın. Topu tutan diğeri doğal olarak it-



Elektriksel kuvvet, foton alışverişiyle meydana gelir.

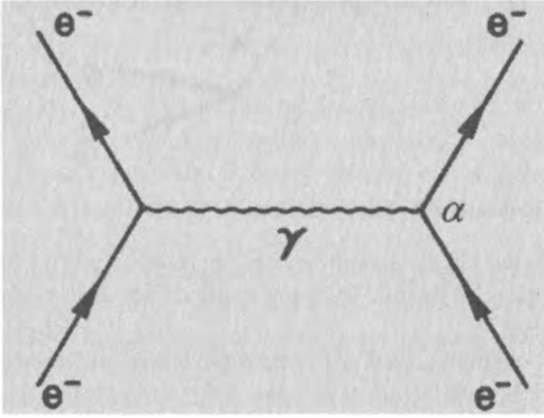
me kuvvetine maruz kalacaktır. Sonra topu yeniden ilk kayıktakine atmasıyla süreç bu şekilde bir ileri bir geri devam eder.

Topa dayalı bu etkileşim, kayıkların birbirinden uzaklaşmasına neden olacaktır. Top sürekli gidip gelecek olursa, tekneler, sanki bir kuvvet etki ediyormuşçasına birbirinden daha da uzaklaşır. Bu kuvvet, topun sürekli gidip gelişleriyle meydana gelir. İki parçacık arasındaki elektromanyetik etkileşimi de benzer şekilde hayal edebiliriz; ancak burada arada gidip gelen top değil, fotonlardır.

**NEWTON:** Top meselesini anladım anlamasına da, ortadaki itici bir kuvvet, çünkü top her defasında bir itme hareketi yaratır. Çekim kuvveti nasıl oluşur peki? Herhalde anlattığınız gibi bir parçacık alışverişiyle değil.

**HEISENBERG:** Siz de her şeyi eksiksiz bilmek istiyorsunuz, değerli dostum. Ama haklısınız, ortada gerçekten çekimle ilgili bir sorun var. Belki top yerine bumerang kullanılsa ve bumerang her defasında arkaya dönülüp tutulmak zorunda kalınsa, uygulayacağı kuvvetin iki tekneyi birbirine yaklaştıracağı söylenebilir. Bu örneği bir kenara bırakalım bence, zira analojiler anlamayı kolaylaştırsa da, çoğu zaman kesinlikten uzaktır. Önemli olan ilkenin kendisi: Bir kuvvetin parçacık alışverişi sonucunda meydana gelmesi kuantum mekaniksel bir süreç olduğundan, klasik anlayışla kavramak pek kolay olmuyor kuşkusuz.

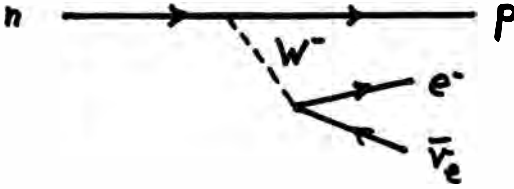
**FEYNMAN:** Bu türden süreçleri hem anlaşılır kılan hem de bunların he-




İki elektronun elektriksel itme kuvvetini gösteren bir Feynman diyagramı.

saplanmasına yarayan bir diyagramım var. Bu Feynman diyagramlarından birini yanımda getirdim. Burada buluşan iki elektron ve aralarında alışveriş edilen foton görülmekte. Fotonun ileri geri gitmesi elektriksel bir itmeye sebep olur. Öte yandan bir elektronla bir pozitron kullanmış olsaydık çekim gücü oluşurdu. Doğada bulabileceğimiz tüm kuvvetleri parçacık alışverişiyle açıklamak mümkün. Daha önce de söylediğimiz gibi elektromanyetik kuvveti fotonlar üretir. Çekirdeği oluşturan parçaların yapıtaşı olan kuarkları bir arada tutan güçlü kuvvet de parçacıklar tarafından iletilmektedir. Bu parçacıklara gluon adı verilir. Tahminimce bu konuya ileride daha ayrıntılı değineceğiz. Zayıf çekirdek etkileşimi, w bozonu, kütleçekimiyse özel kütleçekim parçacıkları, namı diğer gravitonlarla aktarılır – Herr Einstein'ın bu kavramdan pek hoşlanmadığını biliyorum.

Unutmadan şunu da eklemek gerek: Elektromanyetik kuvveti meydana getiren fotonların özgül bir kütlesi yoktur ve değişiklik gösterir. Serbest fotonların kütlesi sıfırdır, gravitonların da öyle. Bunlar ancak parçacıklar alışverişe geçtiğinde belli bir kütle kazanır; bu kütle, koşullara bağlı olarak herhangi bir değere sahip olabilir. Hatta normal koşullarda bu kütlenin karesi negatif olduğundan bunlar serbest fotonlar olarak karşımıza çıkmaz. Sanal parçacık adı verilen bu yapılar varlıklarını ancak kısa süreliğine sürdürebilirler. Mutlak küt-




Nötronun bozunarak proton, elektron ve karşı-nötrino üretmesi.

leleri ne kadar büyükse, ömürleri de aynı oranda kısadır. Heisenberg sanal parçacıklar fikrini Wolfgang Pauli'yle beraber otuzlu yıllarda geliştirmişti.

Beta bozunumu, yani nötronların bozunmasından sorumlu olan zayıf çekirdek etkileşimi, w ve z parçacıkları tarafından aktarılır. Fotona kıyasla oldukça büyük kütleye sahip bu parçacıklardan w parçacığı 80 GeV (giga elektronvolt), z parçacığıysa 91 GeV büyüklüğündedir ve nötronun beta bozunumunun yanı sıra zayıf etkileşimi bunlar üretir.

**NEWTON:** Beta bozunumu nedir? Yine kuvvetlerle alakalı bir şey mi? Peki ya w parçacıklarının buradaki rolü ne? Şu âna kadar sadece kuvvetleri gördük, herhangi bir bozunumdan bahseden olmadı yanılmıyorsam.

**FEYNMAN:** Beta bozunumu nötronun bozunmasına verilen ad. Nötronlar, protonlardan farklı olarak kararlı parçacıklar değil, meydana gelmelerinden 15 dakika sonra bozunuyorlar. Her nötron bozunarak bir proton, bir elektron, bir de nötrino, daha doğrusu bir karşı-nötrino üretir. Yani nötron → proton + elektron + karşı-nötrino.

Nötronlar elektronlarla akraba, ama yük taşımayan parçacıklardır. Elektron ve nötrinoların meydana getirdiği gruba leptonlar adı da verilir. Bozunum dediğimiz süreç, bir zayıf etkileşim etkisidir ve w bozonu alışverişiyle aktarılır.

**NEWTON:** Nötron neden doğrudan protona dönüşmüyor?

**FEYNMAN:** Bunun cevabı basit. Nötronun kütlesi protonunkinden büyük olsa da, aradaki kütle farkı çok değil, toplam kütlenin ancak binde biri kadar. Nötronun neden daha ağır olduğunu hâlâ bilmiyoruz. Kesin olan nötronun protondan hafif olduğu bir dünyada yaşayamazdık, çünkü o zaman proton bozunurdu ve evrende hidrojen, dolayısıyla da bizler var olamazdık.

**NEWTON:** Tuhaf doğrusu, tek bir parçacıktan üç ayrı parçacık oluyor, öyle mi? Protonun içinde elektron ve karşı-nötrino zaten bulunuyor mu peki?

**FEYNMAN:** Hayır, bu parçacıklar bozunum esnasında açığa çıkan enerjiyle meydana gelir. Bozunumun nasıl olacağını tayin eden bir kez daha Einstein denklemi oluyor. Nötronun kütlesi protonunkinden biraz daha fazla olduğu için bozunum esnasında fazladan parçacıklar üretilebilir. Bu esnada ne olduğu uzun süre boyunca anlaşılamamıştı, ama bozunum sırasında nötronun bir proton bir de w bozonuna dönüştüğünü artık biliyoruz. Az önce de belirtildiği üzere, bu parça büyük bir kütleye sahip olduğundan ancak sanal olarak üretilebilir, yani varlığıyla değil, ancak etkisiyle var olur. Tüm bu süreç esnasında bir elektronla bir de karşı-nötrino doğar. Yani w ve z bozonları, elektron ve nötrinolarla sürekli etkileşim halindeler. Tıpkı fotonun da yüklü parçacıklarla etkileşimde olması gibi. Fotonlarla yüklü parçacıkların etkileşimi elektriksel kuvveti, w ve z bozonlarıyla elektron ve nötrinoların etkileşimiyse zayıf kuvveti doğurur.

**HEISENBERG:** W parçacığının kütlesinin ne kadar olduğunu nereden biliyoruz? Belki de böyle bir parçacık hiç yoktur.

**HALLER:** Yo, bu parçacığın varlığı 1983 yılında Cenevre yakınlarında yapılan deneyle kanıtlandı ve kütlesi tayin edildi – maalesef siz göremediniz. Seksenli yılların başında CERN'de, proton ve karşı-protonları son derece yüksek enerjilerle çarpıştırabilen yeni bir hızlandırıcı hizmete alındı ve 1983'te nihayet bu keşif yapıldı.

Önce z bozonu, ardından w bozonu keşfedildi. Z bozonu ağır bir foton olarak görülebilir, bu nedenle de elektron ve nötrinolarla etkileşime girer. Örneğin bozunup bir elektron-pozitron çiftine ya da nötrino ve karşıtı karşı-nötrino çiftine dönüşebilir. Elektrik yüklü parçacıklara dönüşüme neden olan bir bozunumu da kolayca tespit etmek mümkün. Öte yandan negatif yüklü w bozonları elektron ve karşı-nötrino çiftine de dönüşebilir. Karşı-nötrino gözlemlenemediği için sadece elektron görülür, bu da w bozonunun varlığının kanıtlanmasını çok daha zor kılar. Bunun için tepkime esnasında impulsun eksik olduğunu kanıtlamak gerekir. Bu da oldukça zordur.

Kimi çarpıştırma deneylerinde bu parçacıklar gerçekten de üretildi, varlıkları kanıtlanabildi ve kütleleri tespit edildi. Dolayısıyla w bozonlarının varlığından şüphe etmiyoruz. Kuramcılar w parça-

larının varlığını daha ellili yıllarda duyurmuştu ve otuz yıl sonra olsa da gerçekten var oldukları kanıtlandı. Kuramsal fiziğin en büyük zaferlerinden biriydi.

**HEISENBERG:** Benim zamanımda da w bozonlarının varlığı tartışılmaktaydı, ama o zamanlar kütlelerinin en fazla 10 GeV olacağı düşünülüyordu. Tek bir w bozonunun 80 GeV kütleye sahip olması gerçekten takdire şayan. Bu devasa kütleler nasıl meydana geliyor?

**HALLER:** Bakın şimdi zor bir soru sordunuz işte! Kütlenin nasıl meydana geldiği halen büyük bir sır. Hedefimiz CERN'deki inşası daha yeni tamamlanan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ya da kısa adıyla LHC yardımıyla kütlenin oluşumuna yol açan mekanizmaları daha yakından incelemek. Yine de bu konuda daha fazla bilgi sahibi olmamızın uzun yıllar süreceğini tahmin ediyorum. Hatırlatın da bu konuya daha sonra dönelim.

Bilmem hatırlar mısınız, Herr Heisenberg, 1968 yılında sizin doktora öğrencinizken Münih'teki Max Planck Enstitüsü'nde bir sunum yapmış, Steven Weinberg'in w ve z bozonları için 50 GeV üzeri kütleler öngören modelinden de söz etmiştim. O zamanlar Münih'te bu görüş pek ciddiye alınmamış olsa da, seminer sonrası yanıma gelip bana özellikle bu kuram hakkında sorular sormuş, bu görüşü ilginç bulduğunuzu söylemiştiniz. On yıl sonra kuramın doğru olduğu ortaya çıktı.

**HEISENBERG:** Doğru, hatırlıyorum. Çok ağır kütleler kuramından ilk kez sizin sunumunuzla haberdar olmuştum. Yeni ve son derece ilginç bir konuydu.

**NEWTON:** Graviton diye bir parçacık var mı peki?

**HALLER:** Henüz bu konuda kesin bir bilgi yok. Herr Einstein genel görelilik kuramını oluşturduğunda, kütleçekimi gerçek bir kuvvet olarak değil, uzay-zaman geometrisinin bir sonucu olarak nitelendirmişti. Kütleçekiminin bu kuramda yeri yoktu. Yine de birçok fizikçi graviton adlı bir parçadan ve bunun tıpkı foton gibi kütlesiz olduğundan söz etmekte. Tek sorun bu parçacığın muhtemelen asla keşfedilemeyecek olması. Belki de graviton yoktur. Gravitonu kuantum kuramına yerleştirmeyi henüz kimse başaramadı. Herr Einstein, belki siz bu işin üstesinden gelirsiniz.

**EINSTEIN:** Fikrimi sorarsanız, gravitonun var olduğunu düşünmüyo-

rum. Kütleçekimi elektriksel kuvvet gibi gerçek bir kuvvet değildir. Benim kuramımda kütleçekimi, sizin de az önce doğru şekilde ifade ettiğiniz üzere, uzay-zaman geometrisinin bükülmesinin bir sonucudur ve bu etki bir parçacığın varlığıyla açıklanamaz, zira bence uzay-zamanı parçacıklarla bükemezsiniz.

**HALLER:** Gördüğüm kadarıyla bu problemi siz de çözemeyeceksiniz. Şöyle bir özetleyecek olursak: Kuvvetlerin sebebi de parçacıklardır. Bu nedenle lepton adı verilen madde parçacıklarından –daha açık ifadeyle elektron ve nötrinolardan– diğer parçacıklardan ve atom çekirdeklerinin yapıtaşları olan kuarklardan söz ederiz. Bu parçacıkların tümünün $^1/_2$ spini vardır. Kuvvet parçacıkları madde parçacıkları arasında etki eder ve kuvvetleri oluşturur. Bunların da spini vardır ama bunlar $^1/_2$ değil, 1 spindir. Buradaki yegâne istisna graviton. Gerçekten de var olduğunu varsayarsak, bu parçacığın spini 2 olmalıdır.

**NEWTON:** İsterseniz ben de anladığım kadarıyla toparlamaya çalışayım: Hem madde hem de kuvvetler parçacıklardan meydana gelir. Konuyu daha anlaşılır hale getirdiği için bu ilkeden hoşlandım doğrusu. Hiç değilse evrene bakış biçimimiz yeknesaklaşıyor. Ne var ki, hem madde hem de kuvvet parçacıklarının spini aynı olsaydı işler daha da kolaylaşacaktı, ama anladığım kadarıyla böyle değil. Elektron ya da protonlar $^1/_2$ spine, kuvvet parçacıklarıysa 1 spine sahipler. Tuhaf doğrusu.

**FEYNMAN:** Tüm parçacıkların aynı spine sahip olduğu bir evren bizimki kadar çeşitlilik arz etmezdi diye düşünüyorum. Dünyamızın sahip olduğu kompleksliğin spinlerle ilgili olduğu düşünülebilir. Yaşadığımız evrende dört ayrı kuvvetin varlığından haberdarız: kütleçekimi, elektromanyetik kuvvet, zayıf etkileşim ve güçlü çekirdek kuvveti. Bu dördü dışında kuvvet ya da etkileşim henüz keşfedilmiş değil.

**HEISENBERG:** Daha geçenlerde bir bilim dergisinde, CERN'deki LHC cihazı yardımıyla parçacıklara kütle kazandıran yeni bir etkileşim ya da kuvvet aranacağını okudum. Böyle bir şey bulunursa, bu yeni bir kuvvet olmaz mı? Deneydeki son durum nedir?

**HALLER:** Evet, LHC'nin inşasının ana sebeplerinden biri bu. Parçacıkların, özellikle de w ve z bozonlarının kütlesinin nasıl meydana gel-

diğine dair bir kuram var. Parçacıkların kütle kazanması için bir skaler alan lazım. Adı geçen alan, kâşifi Peter Higgs'in adını taşıyan Higgs alanı. Sir Newton gibi İngiliz olan Peter Higgs'in, bu skaler alanın varlığını 1964'te ortaya atan altı fizikçiden biri olduğunu da belirtmem gerek. Kuramın onun adıyla anılmasının yegâne sebebi, adının kısa ve tuhaf bir tınıya sahip olması.

Kendisi ve diğer parçacıklarla etkileşim halinde olması nedeniyle bu alan yeni bir kuvvet olarak yorumlanabilir. Higgs alanının kendi kendisiyle etkileşimi, simetri kırılmasına yol açar ve alan, vakumda bir beklenti değerine ulaşır. Böylelikle son derece yüksek, yaklaşık 294 GeV'lik bir enerji ölçeğine ulaşılır. Bu enerjiyi hesaplamak mümkün değil, bunun yerine beta bozunumu kullanılarak deneysel olarak tayin edilebilir. Enerji w ve z bozonlarına aktarılır ve bunlar da yoğun bir kütleye kavuşur.

**NEWTON:** Kulağa son derece teknik bir konu gibi geliyor. Vakum beklenti değeri nedir? Peki ya fotonu da bu şekilde kütle kazanmaktan alıkoyan ne?

**HALLER:** Elbette bu da kolaylıkla mümkün ama kuram, foton kütle kazanmayacak şekilde kurgulanabilir. Aslında her şey kuramın yapısına bağlı. Hem bu konuya hem de vakum beklenti değerine sonra değineceğiz. Higgs mekanizmasının gerçekten de doğru olup olmadığı henüz açıklık kazanmış değil. Benim kimi kuşkularım var doğrusunu söylemek gerekirse. Ama kısa sürede bu konuda daha çok bilgi sahibi olacağız.

**NEWTON:** Aklıma gelmişken, atom çekirdeğindeki güçlü kuvvet hakkında bir şeyler öğrenmek istiyorum. Bu kuvvet nasıl etki ediyor?

**HEISENBERG:** O zaman önce size tüm atom çekirdeklerinin proton ve nötronlardan meydana geldiğini, tek istisnanınsa çekirdeğinde sadece tek bir proton bulunan hidrojen atomu olduğunu söyleyeyim. Proton ve nötronlar, elektrondan neredeyse 2000 kat daha yoğun bir kütleye sahiptir ve birbirlerine yaklaştıklarında, kısa mesafede etkili güçlü çekirdek kuvveti devreye girer. Atom çekirdeklerinin proton ve nötronlardan meydana gelmesini bu kuvvete borçluyuz. Güçlü kuvvetin düzenlediği başka bir alan da, sadece belli sayıda protonun yine belli sayıda nötronla bir araya gelip atom çekirdeklerini oluşturmasını sağlamak. İki proton iki nötronla bağlanır ve helyum atomunun çekirdeğini meydana getirir. Helyum çekirdekleri son

derece kararlıdır. Rutherford deneylerinde alfa parçacıkları olarak helyum çekirdekleri kullanmıştı.

Nötronun 1932 yılında keşfedilmesiyle, iki parçacığın kütlelerinin neredeyse birbirinin aynı, elektrik yüklerininse aksi olması üzerine kafa yordum. Nihayetinde iki parçacığın da güçlü kuvvet bağlamında aynı değerlikli oldukları sonucuna vardım. İki parçacık arasında izospin adını verdiğim bir simetri söz konusuydu. Elektromanyetik etkileşim bu simetriyi bozuyordu. İzospin simetrisi, fizikte gözlemlenen ilk iç simetriydi ve bu özelliği nedeniyle uzay ve zamandan bağımsızdı.

Bir atom çekirdeğinin yükü, buradaki protonların sayısınca belirlenirken nötronların sayısı değişiklik gösterebilir. Bunlara aynı atomun farklı izotopları denir. Bir soygaz olan neonun çekirdeğinde on proton ve genellikle on nötron bulunur; ancak on bir ya da on iki nötrona sahip neon atomları da vardır.

Bazı izotoplar kararsızdır ve kısa sürede bozunurlar. Bir atom çekirdeğindeki nötron sayısı protonlardan fazla ya da azsa kararsız kabul edilir. Nötron fazlası olan çekirdekler, bir elektron yaymak suretiyle çekirdekteki nötronlardan birini protona dönüştürür. Böylece çekirdeğin yük sayısı bir birim artmış olur. Öte yandan nötron açığı olan çekirdeklerde, protonun nötrona dönüşmesiyle çekirdek yükü bir birim azalır. Bunun için çekirdeğin, elektronun karşıt parçacığı olan bir pozitron yayması gerekir. Her iki çekirdek tepkimesine de beta bozunumu adı verilir ve bunlar sadece zayıf etkileşim sayesinde gerçekleşir.

Beta bozunumu dışında bir de alfa bozunumu vardır. Çekirdek ne kadar büyükse, çekirdek parçacıkları arasındaki bağ da aynı oranda zayıftır. Örnek olarak 238 çekirdek parçacığından müteşekkil uranyum atomu verilebilir. Bu çekirdekteki parçacıklar, alfa parçacıkları yayarak bozunurlar ve geriye 234 çekirdek parçacığına sahip toryum elementinin atom çekirdeği kalır.

Hidrojen atomu çekirdeğinde de protonun dışında nötronların var olması mümkündür. Hidrojen çekirdeğinin bir proton bir de nötrondan meydana gelmesi durumunda bu atoma, ağır hidrojene tekabül eden döteryum adı verilir. Öte yandan çekirdekteki protonun yanında iki nötron varsa, o zaman trityum olur. Helyum çekirdeğinde normalde iki protona eşlik eden iki nötron bulunur. Tek nötronlu

helyum çekirdeklerineyse helyum-3 adı verilir.

**HALLER:** Şu âna kadar sadece atom çekirdeklerinin bozunumundan söz ettik. Şimdi sözü bunun tam aksine, çekirdeklerin eriyip birleşmesi anlamına gelen çekirdek füzyonuna getirmek istiyorum. Burada iki hafif atom birleşip daha ağır bir atom meydana getirir ve bu esnada büyük miktarda enerji açığa çıkar. Einstein formülü uyarınca kütle enerjiye dönüşür.

**NEWTON:** Anlamadım. İki çekirdek de pozitif yüke sahip, yani birbirilerini itmeli. Bu durumda nasıl birleşmelerini bekliyoruz?

**HALLER:** Bunun için iki çekirdeğin büyük bir hızla birbirine yaklaşması gerekir. Aralarındaki mesafe yeterince küçüldüğünde güçlü çekirdek kuvvetinin etkisine giren iki çekirdek birleşir. Çekirdeklerin bu hızlara çıkmaları, ancak çok yüksek sıcaklıklarda mümkündür.

Örnek olarak döteryum ve trityum füzyonunu inceleyelim. Döteryum birer proton ve nötrondan, trityumsa bir proton ve iki nötrondan meydana gelir. Bunlar füzyonla birleşecek olursa ortaya, iki nötron ve iki protondan müteşekkil bir helyum atomu çıkar ve artan nötron büyük bir hızla yayılır. Füzyona katılan iki çekirdeğin kütlesinin neden olduğu bir enerji açığa çıkar.

Güneşten yayılan inanılmaz enerjinin kaynağı, çekirdek füzyonudur. Dünyada bizler bu enerjiden faydalanıyoruz. Çekirdek füzyonu olmaksızın dünya, uzayda uçan soğuk ve cansız bir kaya parçasından ibaret olurdu.

İnsanlık neredeyse 50 yıldır çekirdek füzyonunu, enerji elde etmek amacıyla dünyada tekrarlamaya uğraşıyor. Ne yazık ki bugüne dek bunu ancak bombalarla yapmayı başarabildik. Hidrojen atomlarının işleme ilkesi çekirdek füzyonudur. Ne var ki bombalardan faydalanılabilir bir enerji kazanılamıyor. Dolayısıyla bugüne dek nükleer füzyonu barışçıl amaçla kullanmak mümkün olmadı.

Fransa'nın güneyinde Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör (ITER) adında bir test reaktörü inşa edilmekte. Bu reaktör yardımıyla ilk kez füzyondan enerji kazanılmaya çalışılacak ve başarılı olması durumunda insanlığın enerji sorunu çözülmüş olacak. Füzyonun hammaddesi olan döteryum ve trityum dünyada bol miktarda bulunmakta zira. Döteryum okyanus suyunda var, trityumsa lityumun nötron bombardımanına tutulmasıyla elde edilmekte. Lityuma dünyanın kabuğunda bol miktarda rastlanır. Çekirdek füzyonunda,

alışılageldik nükleer reaktörlerin aksine hiç denecek kadar az miktarlarda radyoaktif atık madde açığa çıkması yöntemin bir başka olumlu yanı.

**EINSTEIN:** Bu konuda şüphelerim var. Onyıllardır bu konuda araştırma yapılmasına karşın halen bir başarı elde edilebilmiş değil. Neyse, olup olmayacağını göreceğiz.

**HALLER:** Beyler anlaşılan o ki, güçlü etkileşimin tüm ayrıntılarını bu gece bitiremeyeceğiz. Bu etkileşim nükleonların temel yapıtaşları olan kuarklarla alakalı. Zaten kuarklar hakkında da konuşacağımız için arzu ederseniz güçlü etkileşimi de o zamana bırakalım.

Şimdi bize düşen, bu akşam yemeğimizi nerede yiyeceğimize karar vermek. Başka bir öneri yoksa, yakınlardaki Kavaliershaus'a gitmeyi teklif ediyorum.

Nitekim öyle yaptılar. Toparlanıp evden çıktıktan sonra göl kenarı boyunca yürüyüp Haller'in önerdiği büyük restorana ulaştılar.

# 9

## Periyodik Cetvel ve Moleküller

Ertesi gün fizikçileri yağmurlu bir sabah karşıladı. Bunun üzerine beş adam sohbetlerini salondaki şöminenin başında sürdürmeyi kararlaştırdı. Einstein odun getirip şömineyi tutuşturdu.

**HEISENBERG:** Kimyasal elementlerin bir periyodik sistem içinde sınıflandırılabileceği kimyagerler tarafından epeydir bilinmekte. Rusya' da yaşayan Dimitri Mendeleyev, atom fiziği hakkında pek bilgisi olmasa da, 19. yüzyılın ikinci yarısında periyodik cetveli geliştirdi. Kimya için ne büyük başarı!

Mendeleyev o günlerde bilinen 63 kimyasal elementi sınıflandırdı ve benzer özellikler gösteren atomların farklı atom kütlelerine sahip olduğunu, neredeyse aynı atom kütlesindeki atomlarınsa birbiriyle alakasız kimyasal özellikler arz edebildiğini gözlemledi. Elementler buna rağmen belli ailelere ayrılabiliyordu. Böylelikle elementlerin yer aldığı periyodik cetveli yaratmış oldu.

Elbette şimdi akla gelen ilk soru, kuantum mekaniğinden yola çıkarak periyodik cetvele ulaşılıp ulaşılamayacağı. Bunu ayrıntılı olarak ilk inceleyen, atomların elektron kabuklarının giderek artan ölçüde dolmasını araştıran Niels Bohr oldu. Bir atomdan bir sonrakine geçildiğinde çekirdek yükü bir birim artar. Yani var olan elektron kabuğuna bir elektron, çekirdeğeyse bir proton eklenir.

Wolfgang Pauli 1925 yılında özellikle alkali metalleri inceledi. Bir süre sonra bu elementlerin ancak yeni bir ilke, kendi adını taşıyan Pauli dışlama ilkesini uyguladığında anlaşılabildiği sonucuna vardı. Periyodik cetveli anlamak için son derece önemli bu ilke 1945 yılın-

da Pauli'ye fizik dalında Nobel Ödülü'nü kazandırdı.

Niels Bohr daha 1912 yılında, bir atomun içindeki elektronların tamamının en düşük enerji seviyesinde bulunmayışının tuhaf olduğuna işaret etmişti. Zira böyle olsaydı, bütün elementler aynı özelliklere sahip olacak, moleküller var olamayacaktı.

Pauli ilkesiyle tam da bunun olması önleniyor. Elektron ve proton gibi yarı sayılı spine sahip parçacıklar için geçerli olan ilke, iki parçacığın aynı kuantum durumunda olamayacağını söyler. Aynı atom içerisinde bulunan iki elektron aynı biçimde titreşebilir, ama en azından spinlerinin farklı yönlerde olması gerekir. Aynı durum atom çekirdekleri için de geçerlidir.

Nitekim hafif elementlere baktığımızda dışlama ilkesini kolayca görebiliriz. Hidrojenin tek elektronu olduğundan ilkenin bir önemi yoktur. Bir sonraki element olan helyumun kabuğunda en az iki elektron yer alır. Spin nedeniyle iç kabukta, spinleri birbirinin aksi yönlerde olan en fazla iki elektron bulunabilir. Başka bir ihtimal de yoktur zaten, zira Pauli dışlama ilkesi spine sahip iki parçacığın asla aynı halde olamayacaklarını söyler. Bu nedenle elektron kabuğu sadece iki elektron alabilir, daha fazlasına yer yoktur. Kabuk kapanmıştır. Nitekim helyum bu sebeple kimyasal olarak aktif değildir, çünkü bir soygazdır.

Bir sonraki element, en hafif metal olan lityumdur. Üç elektronu vardır ve üçüncüsü –tıpkı Pauli'nin öngördüğü gibi– dolu iç kabuğa değil, bir sonrakine yerleşmiştir.

**NEWTON:** Pauli gerçekten de tuhaf fikirlere kapılmış ama işin ilginç yanı bunların doğru çıkması. Pauli ilkesinin bizim dünyamızla alakasınıysa ancak tanrı bilir. Gerçekten de anlaması güç bir ilke. Parçacıkların aynı halde olamamalarını belirleyen spinleri. Yani elektronlar spinsiz parçacıklar olsa, çekirdek fiziği çok farklı bir yol izleyecekti, öyle mi?

**HEISENBERG:** Kesinlikle öyle. Ama bir şey eklemek gerek. Spinleri elektronlara rasgele verilmiş şeyler değil. Elektron gibi spin sahibi parçacıklar, ilk kez Paul Dirac tarafından ortaya atılan bir denklemle tarif edilmektedir. Dirac denklemi, ancak Pauli dışlama koşulunun yerine getirildiği durumlarda Einstein'ın görelilik kuramıyla tutarlılık arz eder. Şimdi bunu kanıtlamak çok vaktimizi alacağı için başka bir zamana bırakmayı teklif ediyorum.

**NEWTON:** Pekâlâ, öyle olsun. Peki buradan, Pauli ilkesinin temel halde bir dizi elektrona sahip olan atomların çok daha karmaşık olmasını şart koştuğu sonucunu çıkarabilir miyiz? Bir s-dalgası içinde, aksi yönde spine sahip sadece iki elektron olabilir, bir sonraki elektronun p-dalgasında olması gerekir vesaire, öyle mi?

**HEISENBERG:** Doğru. Bu sayede atomların temel halleri bile belli bir karmaşıklığa sahip oluyor. Pauli tarafından ortaya atılan bu ilke olmasaydı, evren çok daha yalın bir yer olurdu. Elektronların tümü s-dalgasında titreşir, tüm elementler üç aşağı beş yukarı aynı özelliklere sahip, dünyaysa çok tekdüze bir yer olurdu; neyse ki o zaman da bunları gözlemleyecek kimse olmazdı.

Pauli ilkesi on elektrona sahip neonun, on bir elektronlu sodyumdan nasıl bu kadar farklı olduğunu açıklar. Neon içindeki elektronlar, atomun neredeyse tam bir küre oluşturacağı şekilde titreşir; nitekim neonun kimyasal açıdan aktif olmamasının nedeni budur. Neon, tıpkı helyum gibi soygazdır. Sodyum için durum daha farklıdır. En dış yörüngede tek bir elektronu olduğundan sanki atomun bir çıkıntısı var gibidir. Bu çıkıntı sodyum atomunun kimyasal açıdan son derece aktif olmasını sağlar. Öte yandan bu atomların kimyasal özellikleri çok ani değişiklikler gösterebilir, örneğin sodyum atomunun dış yörüngesindeki elektronun kopması sonucu. Nitekim sofra tuzunda olan tam da budur. Sodyumdan ayrılan elektron klor atomunca devralınır ve ortaya NaCl olarak gösterilen tuz çıkar. Klorun neonla birleşmesiyse mümkün değildir.

**HALLER:** Elektron sayısı bilindiğinde, atomun yaklaşık olarak hangi özellikleri göstereceği öngörülebilir. Örneğin gümüş parlayan bir metaldir, azotsa oda sıcaklığında gaz halde bulunur. Bir başka örnek olarak plütonyum ilk başta nükleer tepkimeler aracılığıyla üretildi. Dünyada bu elemente rastlamak mümkün değil, zira ömrü "sadece" 40 bin yıl. Plütonyumun 94 elektrona sahip olması gerektiği biliniyordu, dolayısıyla kahverengi bir metal olduğu tahmin edilebilirdi. Plütonyumun 94 elektronu olduğunu bildiğiniz takdirde bu sonuçlara erişebilirsiniz. 1945 yılında Los Alamos'ta bir milimetreküp plütonyum üretildiğinde tüm bu çıkarımların doğru olduğunu görmek ilginç olmuştu.

Yaşamın çeşitli fenomenleri de atom ve moleküllerdeki elektronların karakteristik titreşimlerine dayanır. DNA'nın yapısını karbon,

hidrojen, oksijen, azot ve diğer elementlerdeki elektronların sahip oldukları titreşimlerin, o malum sarmalı oluşturacak biçimde olmalarına borçluyuz. Her bahar aynı çiçeklerin açması, çocukların ebeveynlerine benzemesi de aynı yolla, kuantum fiziğiyle açıklanabilir.

**NEWTON:** Johannes Kepler gezegenlerin eliptik yörüngelerinin basit bir geometrik ilkeye boyun eğdiğini düşünüyordu. Ama tahminleri yanlış çıktı, zira yörüngeler tesadüfiyken gezegenler benim bulduğum kütleçekim yasasına boyun eğmek zorunda. Ama görüyorum ki, atom düzeyinde Kepler'in ortaya attığı fikir geçerli olabilir. Elektronların izleyeceği yörünge kuantum mekaniği tarafından kesin biçimde öngörülmüş ve son derece düzenli. Kepler bugünün atom fiziğini tanısa çok şaşırırdı herhalde. Burada işitilen kürelerin uyumu, bir tür kozmik senfoni. Kepler yaşasa herhalde atom fizikçisi olurdu.

**HEISENBERG:** Evet, atom hareketlerini açıklayan fizik, gerçekten de bir tür kozmik senfoni ve tam da Kepler'in zevkine göre. Hidrojen en basit atomdur; elektronu 1s-halindedir. Onu, yükü 2 olan, yani çekirdeğinde iki proton, iki nötron, yörüngesindeyse iki elektron bulunan helyum atomu izler. Helyumun her iki elektronu da 1s-halindedir. Tek fark, helyum elektronlarının bağlanma enerjilerinin, hidrojendeki elektrondan fazla olmasıdır. Çünkü çekirdeğindeki iki proton nedeniyle helyumun elektriksel alanı, hidrojeninkinden otomatik olarak büyüktür. Helyumun iki s-elektrondan oluşan dış kabuğu kapanmıştır, bu nedenle de element kimyasal açıdan kararlıdır. Bağ yapmayan soygazdır. Çekirdeğindeki iki nötron, çekirdeği kararlı tutar.

Bunu çekirdek yükü üç olan üç elektronlu lityum elementi izler. İlave üçüncü elektron 2s-halindedir, zira Pauli ilkesi nedeniyle 1s-hallerinde ikiden fazla elektron bulunamaz. Atom numarası 4 olan berilyumun 2s-halinde iki elektronu vardır. 10 atom numarasına sahip neondaysa altı 2p-elektronu, iki 2s-elektronu, iki de 1s-elektronu bulunur. Bir kez daha dış kabuk tamamlanmış olduğundan ikinci soygazla karşı karşıya olduğumuzu anlarız. Neonun altı adet 2p ve iki adet 2s-elektronu toplam sekiz elektron yapar – yani helyumdaki iki sayısından sonra şimdi sekiz rakamı da önem kazanır.

Atom numarası 11 olan sodyum elementinin en dıştaki elektronu 3s-halindedir ve yeni bir kabukta bulunur. Bağlanma enerjisi daha da azalmıştır. Bu elektron kimyasal tepkimelere kolay girebildiğin-

den, sodyum kimyasal olarak aktif bir elementtir. Devam edecek olursak, bir sonraki dolu kabuk toplam 18 elektrona sahiptir: yine bir soygaz olan argon. Gördüğünüz gibi yine sekiz rakamı – bu elementte iki 1s-elektronunun yanı sıra iki çarpı sekiz elektron vardır.

Bir sonraki dolu elektron kabuğu, toplam 36 elektronlu kripton gazıdır, bir sonraki 54 elektronlu ksenon – tahmin edileceği üzere, yine bir soygaz. Bu türden bilinen son elementse, 86 elektrona sahip radondur.

Elektron sayısı yüksek olan elementler, şimdi ayrıntısına girmek istemediğim bir dizi özelliğe sahiptir. Nihayetinde 92 elektron, aynı sayıda proton ve genellikle 146 nötrona sahip uranyum gibi ağır elementlere ulaşırız. Uranyumun çok karmaşık bir atom olduğu aşikâr. Uranyum radyoaktif bir elementtir. Bozunuma uğrar ama yarılanma ömrü 4,5 milyar yıl gibi uzun bir süredir.

**NEWTON:** Dikkatimi çeken bir nokta, örneğin helyum ya da karbon gibi hafif elementlerde nötron ve proton sayılarının eşit olduğu, altın ya da uranyum gibi ağırlardaysa olmadığı. Nötronların sayısı bu elementlerde artıyor, uranyumda protonlar kütlenin sadece yüzde 39'unu oluştururken, nötronlar yüzde 61'ini meydana getiriyor. Sizce de tuhaf değil mi?

**HEISENBERG:** Her zamanki gibi güzel bir soru Mr. Newton. Zamanında buna biz de bir açıklama bulamamıştık. Bugünse bu özelliğin çekirdek kuvvetleriyle alakalı olduğunu biliyoruz. Oluşacak itme kuvveti nedeniyle salt protonlardan müteşekkil bir atom çekirdeği var olamaz. Çekirdekte yer alan nötronlarla protonlar arasında güçlü çekirdek kuvveti olduğundan, bu itme kuvveti bir ölçüde engellenmiş oluyor. Üstelik nötronlar itme kuvvetini de seyreltiyor. Hafif elementlerin çekirdeklerinde iki parçacığın eşit miktarda olması en uygunu. Büyük çekirdeklerdeyse elektrostatik itme kuvveti büyük olacağından daha çok nötrona ihtiyaç var. Uranyumun sadece 92 nötronla ayakta kalması mümkün olmazdı, 146 bile kıt kanaat yetiyor, zira bu haliyle atom yeterince kararlı değil. Bozunuma uğruyor ama dediğim gibi yarılanma ömrü gerçekten çok uzun.

**HALLER:** Kuantum mekaniği sayesinde periyodik cetveli açıklamak mümkün oldu. Kuantum fiziği kimyanın gelişimine ilk kez bu kadar büyük bir katkıda bulunmuştu. Nitekim bir fizikçi olarak kimyayı, uygulamalı fizik olarak adlandırmayı severim.

| 1a | 2a | 3b | 4b | 5b | 6b | 7b | 8 | | | 1b | 2b | 3a | 4a | 5a | 6a | 7a | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 55 Cs | 56 Ba | 57 La | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn |
| 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Uun | 111 Uuu | 112 Uub | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lantanit | 57 La | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu |
| Aktinit | 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr |

Metal | Yarı metal | Ametal

Elementlerin dizili olduğu periyodik cetvel.

**HEISENBERG:** Ben de sizin gibi fizik şoveniyim. Bana sorarsanız kimya bağımsız bir bilim değil, fiziğin bir dalıdır. Elbette bu görüşümle kimya alanında çalışan arkadaşlarımın katı eleştirilerine hedef oluyorum.

**EINSTEIN:** Ben de sizler gibi düşünüyorum. Bırakın kimya dalındaki arkadaşlarımız bizi eleştirsinler. Hoşlarına gitse de gitmese de, bize göre kimya fiziğin bir dalı.

**HALLER:** Görüşünüze katılıyorum. Kimya kendi başına ilginç bir bilim olsa da, periyodik cetvele katkısı, fiziğinki kadar olmamıştır.

Yeri gelmişken, Herr Einstein'ı ilgilendireceğini düşündüğüm bir not düşmek istiyorum. 1925 yılında, neredeyse hiç enerjisi kalmayana kadar soğutulan parçacıklara ne olduğu sorusuyla ilgilenmiştiniz yanlış hatırlamıyorsam. İşte bu durum ancak belli bir parçacık türünde, Bose parçacıklarında mümkündür.

**NEWTON:** Bose parçacığı da nedir?

**HALLER:** Hint fizikçi Satyendranath Bose o zamanlar iki türden parçacığın olabileceğini ileri sürmüştü; bunlar bir tarafta elektron ve

proton gibi Fermi parçacıkları, yani fermiyonlar, diğer taraftaysa Bose parçacıkları ya da diğer adıyla bozonlar. Fermiyonların dalga fonksiyonlarının asimetrik olması gerekir, oysa bozonların dalga fonksiyonu simetriktir. Fermiyonlar yarı sayılı spine sahiptir, bozonların spiniyse tamsayılıdır. Yani tamsayılı spine sahip atomlar Bose parçacıklarıdır.

Bunları soğuttuğunuzda, sonunda en düşük enerji seviyesine inerler. Dalga fonksiyonları simetrik olamadığı için fermiyonlarda bu mümkün değildir, yani en düşük enerji seviyesi sadece bir kez doldurulabilir. Öte yandan bozonlarla bu pekâlâ mümkündür. Siz Herr Einstein, bu etkiyi öngörmüştünüz. Günümüzde buna Bose-Einstein yoğuşması adı verilir.

Çok sayıda atomu lazerler yardımıyla neredeyse mutlak sıfıra kadar soğutmanın ancak birkaç yıl önce başarılmasıyla bu etkinin doğruluğunu denetlemek nihayet mümkün oldu. Örnek olarak, yaklaşık 2 bin rubidyum atomu neredeyse mutlak sıfıra kadar soğutulabilir. Söz konusu atomlar bu durumda bağımsızlıklarını yitirir ve tek bir süper atom gibi davranır. Uygun adım yürür gibi.

**EINSTEIN:** Kulağa hoş geliyor. O zamanlar, yani 1925 yılında bunun yapılabileceğine pek ihtimal vermemiştim açıkçası. Demek oluyor ki, deneysel fizikçiler o günlerde tahmin ettiğimden daha akıllıymış. Bu yoğunlaşma ilginç bir olgu – itiraf etmem gerekir ki, kuantum mekaniğinden yavaş yavaş hoşlanmaya başladım.

**HALLER:** Bin dokuz yüz yetmişli yıllardan bu yana, elektron gibi parçacıkların yalıtılıp özel tuzaklarda saklanabildiğini eklemek isterim. Bu alanın öncü isimlerinden biri olan Seattle'daki Washington Üniversitesi'nden Hans Dehmelt, bir elektronu neredeyse bir yıl boyunca özel bir tuzakta tutmayı başardı. Ardından aynı deneyi bir pozitronla tekrarladı. Parçacığın gerçekliğini biraz daha vurgulamak için Dehmelt pozitrona bir de isim vermişti: Priscilla. Parçacık tuzakta üç ay geçirdikten sonra ansızın kayboldu – büyük olasılıkla bir elektronla çarpışmış ve elimine olmuştu. Priscilla ölmüştü.

**NEWTON:** Bir sorum daha olacak. Çoğu atomun tek başlarına var olamadıklarını, moleküller biçiminde bir araya geldiklerini biliyoruz. Örneğin hidrojen $H_2$ molekülünü meydana getirir. Birbirinin aynı iki atom nasıl birleşir? Elektronlar karşılıklı olarak birbirlerini itiyorsa, iki hidrojen atomu nasıl birleşip bir molekül meydana getirebilir?

**FEYNMAN:** Söz konusu olan atomları anlamaksa kuantum mekaniği nispeten basittir; ne var ki moleküllere geldiğimizde iş değişir. Biyokimyanın ilgi alanına giren büyük biyomolekülleri, Schrödinger denklemiyle anlayamazsınız. Çoğu zaman bunlar niceliksel olarak ya hiç işe yaramayan ya da sadece kimi zaman işe yarayan yöntemlerle ancak yaklaşık olarak değerlendirilebilir.

**NEWTON:** Buna bir itirazım yok. Zaten benim niyetim de büyük bir biyomolekülü değil, basit bir hidrojen molekülünü anlamak. İki atom bir molekülü nasıl meydana getirir? Hidrojen atomu elektriksel açıdan nötr; dolayısıyla bağ kuramaması gerekmez mi?

**FEYNMAN:** Aksine, bir bağ var. Kuantum mekaniğinin sebep olduğu, anlaması kolay olmayan özel bir durum sayesinde. Anlaşılırlığı sağlamak için öncelikle pozitif yüklü bir hidrojen molekülüne bakalım: Molekül iki atom çekirdeği, yani iki proton ve bir de elektrondan meydana gelir. İki proton birbirini iter, elektronsa bunların etrafında döner. Peki bu koşullar altında bir molekül nasıl oluşur?

Her iki proton arasındaki mesafeyi r ölçüsüyle sabitleyip elektronun enerji seviyelerini hesaplayarak bu sorunu kolayca çözebiliriz. En düşük enerji seviyesine bakmak yeterli olacaktır. Enerji r mesafesine bağlıdır. Belli bir r değeri için asgari bir enerjiye erişilir; burası yatışkın hali teşkil eder. Böyle bir asgari düzeyin varlığının mecburiyeti aşikâr. Çünkü r çok küçük olduğunda, iki proton birbirlerini güçlü biçimde iter. Öte yandan r büyük olduğundaysa itme kuvveti herhangi bir rol oynamayacak ve elektron iki protonun etrafında salınacaktır. Bu mesafenin en az olduğu durum, Bohr yarıçapının 1,5 katıdır. Bu seviyede kararlı bir sisteme kavuşuruz.

Şimdi iki hidrojen atomuna dönelim. Bunları birbirine yeterince yaklaştırmamla her iki atomun elektronları, aslında hangi protonun etrafında dönmeleri gerektiğini ayırt edemez duruma gelir. Dolayısıyla her ikisinin de etrafında dönerler. Kuantum mekaniksel bir ifadeyle iki protonun etrafında bir yük bulutu oluşmuştur. Bu sayede bir molekül elde etmiş oluruz.

**NEWTON:** Peki her iki protonu füzyonla birleştirsek, bir tür nötronsuz helyum atomu elde etmiş olmaz mıyız? Böyle bir şey neden olmuyor?

**FEYNMAN:** Elektrik yüklerinin aynı olması nedeniyle protonlar birbirini iter. Bir araya gelmeleri mümkün değildir. İki protonu, çekirdek

kuvvetini etkinleştirecek biçimde yüksek hızla ateşleyebilirsiniz ama o da sadece kısa süreliğine etkili olur. Elektrostatik itme kuvveti çok güçlü olduğundan protonlar hızla birbirinden uzaklaşacaktır. Helyum atomundaki protonlar arasındaki çekim kuvvetinin nedeni, aynı çekirdekte bulunan nötronlardır. Bunlar da güçlü çekirdek kuvvetine katılır. Dört parçacığın dahil olduğu çekirdek kuvveti, tek başına iki protonunkinden büyüktür.

Tekrar helyum atomuna dönecek olursak, burada çekirdekte ikişer proton ve nötron, kabuktaysa iki elektron olduğunu görürüz. İki hidrojen atomu da benzer bir tablo meydana getirir – bir çekirdek oluşturamayan iki proton ve kabukta iki elektron. Elektronlar helyum atomundaki türdeşleriyle benzer davranış sergileyerek kapalı bir elektron kabuğu teşkil eder.

Şimdi, iki hidrojen atomunu yaklaştırdığınızda, önce elektronların neden olduğu bir çekim kuvveti oluşur. Atomlar biraz daha, örneğin Bohr yarıçapı seviyesinde yakınlaştığında bu kez itme kuvveti devreye girer. Yani iki proton da birbirlerine oldukça uzaktır. Elektronların münferit protonlar etrafında hareket ettiği, tıpkı helyum soygazınınkine benzer bir elektron yapılanmasına ulaşırız.

İki proton arasındaki potansiyel, osilatör potansiyelini çağrıştırır. Protonlar yakınlaştıklarında bir itme, uzaklaştıklarındaysa tekrar çekim kuvveti oluşur. Bu nedenle moleküllerde hafif bir salınım hareketi vardır.

Spinle ilgili eklenecek bir nokta daha var. Elektron spinleri birbirini götürür ve hidrojen molekülünün toplam spini sıfıra tekabül eder – tıpkı parahelyumda olduğu üzere. İki hidrojen atomu buluştuğunda, ancak elektronlarının spinleri paralel değilse bir molekül oluşturur. Elektronları paralel olduğundaysa birbirlerini iterler.

**HALLER:** Daha büyük moleküllerde işler biraz karışıyor. O zaman çeşitli kuvvetler genellikle yöne bağlı oluyor, tıpkı su molekülünde olduğu gibi. Su hidrojen ve oksijenin bir araya gelmesiyle oluşur: $H_2O$. Buradaki iki hidrojen, yöne bağlı kuvvetler yüzünden oksijen atomuyla 105 derecelik bir açıyla birleşir.

**HEISENBERG:** Atomlar molekül oluşturarak soygazlarınkine benzer bir hale ulaşmaya çabalamaktadır. NaCl moleküler yapısına sahip sofra tuzu iyi bir örnek aslında. Burada klor, sodyumdan bir elektron ödünç alarak bir soygaz olan argonunkine benzer elektron yapı-

sına kavuşur. Sodyumsa bir elektron verdiği için neon soygazına benzer bir elektron yapısına. Elektrostatik kuvvet nedeniyle atomlar yakınlaşır ve bir molekül meydana getirir.

Su molekülünde oksijen, hidrojen atomlarının iki elektronunu alır ve neonun elektron yapısına kavuşur. Biyomolekül gibi daha büyük yapılarda süreç çok daha karmaşıktır. Ama bu konuya daha fazla vakit ayırmamıza gerek olmadığını düşünüyorum.

**HALLER**: Karbon atomlarından meydana gelen büyük moleküllere bakın. Bir futbol topu altıgen parçaların dikişlerle birbirlerine tutturulmasıyla elde edilir. Altıgen parçalarla elde edilebilecek en küçük futbol topunun 60 köşesi vardır. Bu köşelerin her birine karbon atomları yerleştirirsek büyük bir molekül oluşmuş olur. Bu gibi moleküllere Fulleren denir ve adlarını, altıgenlerden müteşekkil kubbeler tasarlayan Amerikalı mimar Richard Buckminster Fuller'dan alır.

Beyler, sizin de fark ettiğiniz gibi öğle oldu. Hep beraber Potsdam'a inmeyi öneriyorum. Ne dersiniz?

Az sonra bir taksiye doluşup yakındaki Potsdam'a doğru yola çıktılar. Burada Haller'in daha önce gittiği Zur historischen Mühle restoranına gittiler. Öğle yemeğinin ardından Potsdam'da ufak bir yürüyüş için vakitleri bile kalmıştı. Sanssouci'ye kadar yürüyüp Prusya Kralı II. Friedrich'in sarayını gezdiler.

# 10

# Kuantum Kuramı ve Uzay ile Zamanın Göreliliği

Sabah olduğunda terasta buluştular. Güneş açmıştı ve hava hızla ısındı. Sözü ilk olarak Heisenberg aldı.

**HEISENBERG:** Elektronun spininden bu kadar söz ettikten sonra, Einstein'ın görelilik kuramını kuantum mekaniğiyle birleştirmeyi başaran Paul Dirac'ı unutmak olmaz. Matematik zekâsı son derece gelişmiş bir elektronik mühendisi olan Dirac, bu konu hakkında uzun süre kafa yormuş ve sonunda, daha önce sözünü ettiğimiz Dirac denklemiyle 1928 yılında çözüme ulaşmıştı.

Dirac'ın amacı, Schrödinger denklemini göreli şekilde genelleştirmekti. Buradaki temel sorun, uzay ile zamanın denkleme ancak farklı biçimlerde dahil olması. Schrödinger denklemi görelilik dışı bir formüldür. Serbest bir parçacığın Schrödinger denklemi oldukça yalındır. Dalga fonksiyonunun zaman türevinin, fonksiyonun uzamsal türevinin karesiyle orantılı olduğunu söyler. Burada p impulsu, dalga fonksiyonunun hacimsel türeviyle orantılıdır.

Dirac öncelikle Schrödinger denklemini değiştirerek görelilik kuramıyla uyumlu hale getirmeye çalıştı. Schrödinger denklemi göreliliğe uymaz, zira uzay koordinatlarına göre ikinci türev alınırken zamana göre birinci türev alınır. Dolayısıyla uzay ile zaman arasında elle tutulur farklar oluştuğundan bir uzay-zamandan söz edilemez. İlk zaman türevinin yerine bir ikincisi ikame edilebilir. Nitekim Oskar Klein Stockholm'de bunu yapmayı denedi. Sonucunda ortaya


Paul Dirac

Klein-Gordon denklemi çıktı. Ne var ki bu denklem başlı başına bazı sorunlara sebep oluyordu. Bunlara daha ayrıntılı olarak girmek yerine, denklemin olasılığın sağlanmasına imkân tanımadığını söylemekle yetineyim. Klein-Gordon denkleminin başarısızlığı karşısında Dirac'ın aklına başka bir şey geldi. İkinci uzamsal türevi, birinci türevle ikame etti.

**NEWTON:** Böyle bir şey mümkün mü? Uzay koordinatlarını gösteren ilk türev daima belli bir yönü işaret eder. Bu bir gradyandır ve vektöre karşılık gelir. İkinci türevdeyse böyle olması gerekmez, en azından ikinci türevlerin toplamına üç boyuttan bakıldığında – ki Schrödinger denkleminde tam da bu toplam kullanılmaktadır. Bu nedenle denklem rotasyon yönünde simetriktir.

**FEYNMAN:** Evet, haklısınız; ama Dirac bu sorunu aşmak için dâhice bir çözümle dört türevin her birini bir matrisle çarptı. Günümüzde Dirac'ın adıyla tanıdığımız bu matrisler simetrik olarak çarpıldığında belli özellikler arz eder. Fazla ayrıntıya girmeden bunların üç adet Pauli matrisiyle yakından ilişkili olduklarını söylemekle yetineyim. 4 x 4 matrisi olduklarından dalga fonksiyonu da basit değildir ve dört ayrı dalga fonksiyonundan meydana gelir.

Daha iyi anlaşılabilmesi için Dirac matrislerini şu şekilde göstereyim. Buradaki i indeksi, söz konusu yönü gösterir. 0 indeksiyse zamandır:

$$\gamma^i = \begin{bmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{bmatrix} \quad \gamma^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

**NEWTON:** Peki ama neden dört ayrı dalga fonksiyonu var? Neyi tarif etmekteler? Elektronun, spinleri nedeniyle iki dalga fonksiyonuna sahip olduğunu sanıyordum.

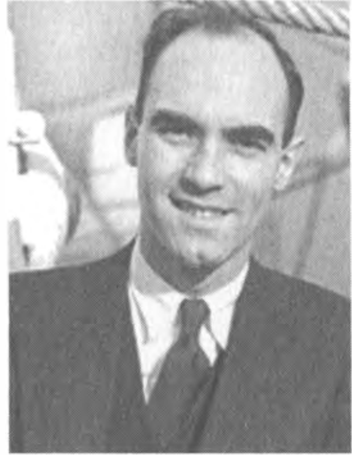
**HEISENBERG:** Dirac iki bileşeni yerleştirmekte hiçbir güçlük çekmedi, zira sizin de işaret ettiğiniz üzere bunlar spinle alakalı. Bildiğimiz gibi spin aslında açısal momentum değil, içsel bir niceliktir. Bir atom içerisindeki bir elektronun açısal momentumu olabilir de olmayabilir de; kesin olan her zaman bir spine, yani $^1/_2$ spine sahip olacağıdır. Şimdi diğer iki bileşene gelelim. Paul Dirac, denkleminin sadece parçacıkları değil, yepyeni bir şeyi, karşı-parçacıkları da tarif ettiğini buldu. Ona göre her parçacığın, aynı kütleye sahip bir de karşıtı vardı. Elektronun karşı-parçacığı pozitrondur ve yükü ters, yani +1'dir.

Dirac 1928 yılında denklemini oluşturduğunda bu karşı-parçacıkların varlığından kesin olarak emin değildi. Başta elektronun karşı-parçacığının proton olabileceğini düşündü ama kütleleri farklı olduğundan bu mümkün değildi. Aradan üç yıl geçtikten sonra, 1931 yılında Dirac pozitron adında bir parçacığın var olması gerektiği sonucuna vardı.

Pasadena'daki Caltech yerleşkesinde çalışan Carl David Anderson ertesi yıl kozmik ışınlarla ilginç bir deney gerçekleştirdi. Sis odasında iz bırakan parçacıkların yüklerini yakından inceleyerek yeni bir parçacığın varlığını keşfetti. Parçacığın, elektronla aynı izi bırakırken manyetik alanda tam aksi yönde sapma göstermesine şaşırdı. Kısa sürede bu parçacığın elektronla aynı kütleye ama pozitif yüke sahip olduğunu buldu.

**HALLER:** Anderson, Dirac'ın kuramından haberdar değildi. Buna rağmen Caltech'te karşı-maddeyi keşfetti ve bunun için 1936 yılında fizik dalında Nobel Ödülü aldı. 1970'li yıllarda aynı üniversitede çalışırken onunla tanışma fırsatım olmuştu. Uzun süredir emekli olmasına karşın düzenli olarak derslere girerdi. Bu dönemde bol bol sohbet ettik.

**HEISENBERG:** Bugün, Dirac denklemiyle tarif edilemeyenler de dahil



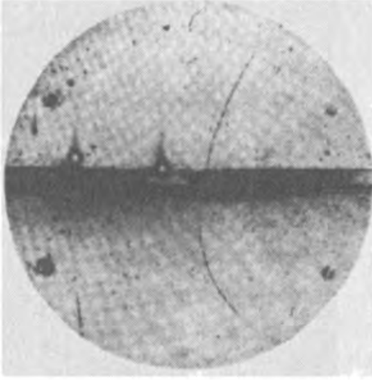
Carl David Anderson

tüm parçacıkların birer karşı-parçacığa sahip olduklarını biliyoruz. Bazı istisnai durumlarda karşı-parçacık, parçacığın kendisiyle aynı olabiliyor. Elbette böyle bir durum, örneğin foton gibi elektriksel olarak nötr parçalarda mümkün ancak. C-simetrisi adıyla anılan, parçacık ile karşı-parçacık arasındaki bu bakışım, fiziğin en temel simetrilerinden biridir. Ne var ki bu kesin bir simetri değil. Nitekim ileride ele alacağımız zayıf etkileşim, daha ziyade buna aykırı niteliğe sahiptir.

Protonun karşı-parçacığı olan karşı-proton geçtiğimiz yüzyılın ellili yıllarında Berkeley'de keşfedildi. Bir karşı-proton oluşturmaya yetecek enerjiyi üretecek bir hızlandırıcı kurulduktan sonra, parçacığın bulunması da uzun sürmedi. Kısa sürede buna karşı-nötron da eklendi.

**NEWTON:** Her parçacığın bir de karşıtı varsa, evrenimiz neden parçacık ile karşı-parçacık arasında simetrik değil? Karşı-parçacıklarla da atom, daha doğrusu karşı-atomlar inşa etmek mümkün olsa gerek. Bunlar da nihayetinde karşı-maddeyi meydana getirir. Ama ortalıkta karşı-madde görmüyorum. Nerede bu madde?

**HALLER:** Karşı-parçacık üretmek aslında zor değildir. İsterseniz şöyle bir örnek vereyim. Hızlandırıcıdaki bir çarpışma esnasında üretilen enerji yüklü foton, kısa sürede bozunarak elektron ve pozitrondan müteşekkil bir çifte dönüşür. Her iki parçacık da hızla birbirin-



Bir pozitronun Anderson'ın sis odasında bıraktığı iz.

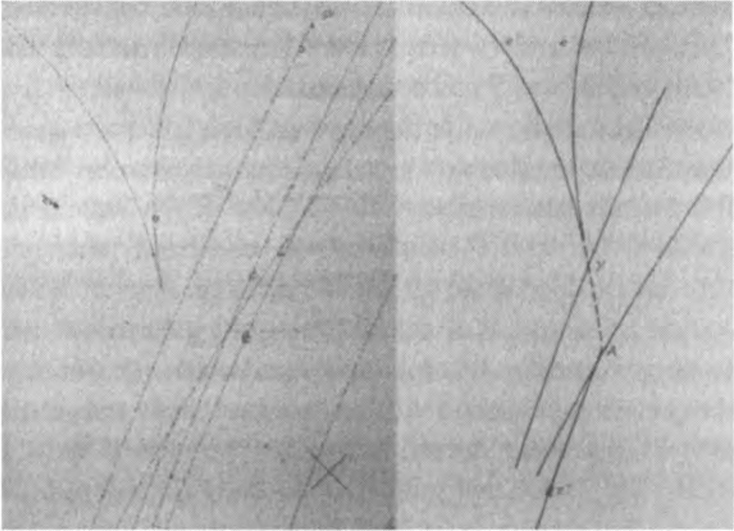
den ayrılırken pozitron uzun süre hayatta kalamaz, çünkü bir atoma rastladığında pozitron ile söz konusu atomun kabuğundaki elektronlardan biri birbirini götürür. Anderson'ın bulduğu pozitron bu şekilde üretilmişti.

Öte yandan, evrenin bir köşesini sadece karşı-madde kaplıyor olabilir. Bu durumda karşı-madde, ışımayla bozunmadığından süresiz olarak var olacaktır. Günümüze dek süren bu arayışta henüz başarılı olunabilmiş değil. Anlaşılan o ki, evrenimiz sadece maddeden müteşekkil.

**HEISENBERG:** Bunu nasıl biliyorsunuz? Uzayın ırak köşelerinde karşı-galaksiler yer alıyor olabilir. Bu durumda evrende pekâlâ madde kadar karşı-madde de bulunabilir.

**HALLER:** Karşı-madde uzun süre arandı. Evrenin herhangi bir yerinde bir karşı-yıldız olsaydı, mutlaka normal bir yıldızla çarpışır ve başta elektromanyetik ışımanın yoğun olduğu büyük bir enerji ortaya çıkardı. Ne var ki bugüne dek böyle bir fenomen gözlemlenemedi. Sizin bahsettiğiniz karşı-galaksiler normal galaksilerle çarpışabilir, bu durumda olağanüstü enerji miktarları evrene yayılırdı. Böyle bir olay da görülmüş değil. Evrenimizdeki maddenin yüzde 50'sini karşı-maddenin oluşturmadığını artık biliyoruz, çünkü teleskoplarla sürekli yıldız ve galaksi çarpışmaları arıyoruz.

**NEWTON:** Peki ama sizce de ortada bir sorun yok mu? Evrende karşı-madde yer almamasına rağmen karşı-parçacıkların üretilebilmesi bence büyük bir problem teşkil ediyor. Evrenimizdeki karşı-madde



Resmin sol tarafında bir elektron ve bir pozitronun oluşumuna ait kabarcık odası görüntüsü, sağda ise bunun kuramsal yorumu yer almakta. Çarpışma esnasında yayılan foton, kısa sürede bir elektron-pozitron çiftine dönüşür.

nerede? Bugünlerde sık sık evrendeki tüm maddeyi üreten Büyük Patlama'dan söz ediliyor. Böyle bir olgu ancak madde ve karşı-maddenin aynı miktarlarda üretilmesiyle mümkün olmalı. Dolayısıyla evrende madde kadar karşı-madde de olmalı.

**HALLER**: Parçacık fizikçileri bu konuya epey kafa yorduktan sonra basit bir çözüm üzerinde mutabakata vardı. Evrendeki maddenin 14 milyar yıl önce gerçekleşmiş devasa bir patlamadan meydana geldiği düşünülüyor. O anda tüm kozmos aynı oranda madde ve karşı-madde içermekteydi. Ancak bu simetri küçük bir dengesizlik arz ediyordu. Hemen şunu not düşmeme izin verin: Simetrideki bu dengesizlik, k-mezon adı verilen yeni parçacıklar sayesinde parçacık fiziğinde de gözlemlendi. Laboratuvar ortamında kanıtlanan bu dengesizlik son derece küçük, öyle ki, beta bozunumundan sorumlu olan zayıf etkileşimden bile bin kat daha zayıf.

Bu dengesizlik nedeniyle evrende, on milyar parçacık ve karşıparçacık çiftine karşılık bir ilave parçacık yer alıyordu. Evrendeki

tüm karşı-parçacıklar parçacıklarla eşleşip, geride zayıf elektromanyetik arka plan ışıması biçiminde bir enerji bırakarak yok oldular ve sayıları fazla olduğu için karşı-parçacıklarla eşleşmeyen madde parçacıkları artakaldı. Başlangıçta simetride görülen bu küçük dengesizlik, zamanla çiftlerin yok oluşuna sebep oldu. Bu yüzden günümüzde parçacık ile karşı-parçacık arasında bir simetri yoktur. Nihai olarak ulaşılan açıklama bu yönde. Gerçekte olanın bu olup olmadığını bilmiyoruz, ama akla yakın geliyor.

**EINSTEIN:** Açıkçası ben doğru olduğundan pek emin değilim ama öyle olduğunu kabul edelim. Ne de olsa daha iyi bir çözüm sunabilecek durumda değilim.

**FEYNMAN:** Tekrar Dirac denklemine dönelim. Bunun, Schrödinger denkleminin göreli biçimi olduğunu unutmamak lazım. Spin, kuantum mekaniğinden otomatik olarak çıkar ve Einstein'ın kuramını meydana getirir: Uzun lafın kısası, Planck ile Einstein'ı birleştirdiğinizde spine ulaşıyorsunuz.

**HALLER:** Günümüzde parçacık fiziğinde tüm parçacıkları spinlerine göre 0, $^1/_2$, 1, $^3/_2$ vb. spinli parçacıklar şeklinde gruplara ayırdığımızı eklemek istiyorum.

**NEWTON:** $^3/_2$ spinli parçacıklar da mı var?

**HALLER:** Evet, ama bunlar kararlı ve temel parçacık olarak kabul edilmez. Örneğin protonun 1,8 katı bir kütleye sahip olan ünlü hiperon $\Omega^-$. Üretildikten hemen sonra bozunarak genellikle bir protona ve mezon olarak adlandırılan 0 spinli iki parçacığa dönüşür. Mezonlar da kararsızdır, bir elektrona ve $^1/_2$ spinli nötrinolara dönüşür.

**NEWTON:** Peki ya nötrinolar?

**HALLER:** Nötrinolar tıpkı elektronlar gibi kararlıdır. Varlıkları geçtiğimiz asrın yirmili yıllarında Wolfgang Pauli tarafından ortaya atıldı, zira atom çekirdeklerinin beta bozunumunu başka türlü açıklamak mümkün olmuyordu. Bazı atom çekirdekleri kararsızdır ve bir elektron yayarak bozunurlar. Atom çekirdeğinin bozunum öncesi ve sonrasındaki kütlesi kesin olarak tespit edildiğinde, elektronun enerjisi sizin formülünüz sayesinde kesin olarak hesaplandı Herr Einstein ve elektronun enerjisinin her defasında beklenenden daha az çıktığı görüldü. Niels Bohr bu sorunu aşabilmek için enerjinin korunumu yasasını kuantum mekaniğinden çıkarmayı bile düşündü.

**NEWTON:** Yüce tanrım, daha neler! Bohr denen bu arkadaş da hiçbir şeyden çekinmemiş.

**HALLER:** Evet. Pauli de sizin gibi düşünmüş olacak ki, korunum yasasını yeniden dahil etti ve bozunum öncesi ve sonrası arasındaki enerji farkının, elektronla beraber yayılan bir başka nötr parçacıktan, yani küçük bir nötron olan nötrinodan kaynaklanabileceğini öne sürdü. Ancak Pauli'nin kendisi bu çözümden çok mutlu olmamıştı, zira nötrinoların asla gözlemlenemeyeceğini düşünüyordu. Bu noktada yanılmıştı.

Bir nötrino tesadüfen bir atom çekirdeğiyle kafa kafaya çarpışacak olursa, her zaman değilse bile çoğu kez bir elektrona dönüşür. 1956 yılında elektron-nötrinoların varlığı da bu şekilde kanıtlandı. Bu amaçla ABD'nin atom bombaları için gerekli nükleer maddeyi ürettiği Güney Carolina'daki Savannah Nehri yakınlarındaki büyük nükleer reaktörden gelen yoğun nötrino akımı incelendi. Araştırmayı, sonradan Nobel Ödülü kazanacak olan Frederick Reines ve yardımcısı Clyde L. Cowan yürütüyordu. O dönemde önemli bir bilgi olan bombaya konulacak madde miktarının Sovyet fizikçiler tarafından kolayca hesaplamasına imkân vermemek için Reines ve Cowan' ın keşiflerini tüm ayrıntılarıyla açıklamalarına izin verilmemişti.

**NEWTON:** Tanrım, nötrinolar gerçekten de tuhaf hayalet parçacıklarmış. Ama en azından enerjinin korunumu yasasını kurtardılar. Pauli'nin aklına sağlık. Bu arada, az önce kararsız mezondan söz ettiğinizi hatırlıyorum. Yani evrenimizdeki tüm kararlı parçacıklar bu tuhaf spine mi sahip?

**HALLER:** Evet. İstisnası da var elbette. İtalyan fizikçi Enrico Fermi' nin adıyla anılan fermiyonlar, $^{1}/_{2}$, $^{3}/_{2}$ gibi yarı sayılı spine sahip parçacıklardır. Tamsayılı spini olan parçacıklaraysa bozon adı verilir. Atom çekirdeğini bir arada tutan güçlü çekirdek etkileşiminin aktarılmasından sorumlu bozonlara mezon denir. Yine güçlü çekirdek etkileşimine sahip, bu kez yarı sayılı spini olan parçacıklarsa baryon adıyla anılır. Proton ve nötronlar baryon sınıfındadır.

Evrenimizdeki kararlı parçacıklar proton, elektron, nötrino ve bunların karşıt parçacıkları, yani spin sahibi maddedir. Bunlar dışında kalan tüm parçacıklar kararsızdır – elbette Sayın Einstein'ın bilime kazandırdığı, ışık parçacığı foton hariç. Herhangi bir kütlesi olmadığından foton bozunmaz. Aynı durum elektron için de geçerli,

ama bunun sebebi kendinden daha az kütleye sahip parçacık olmaması.

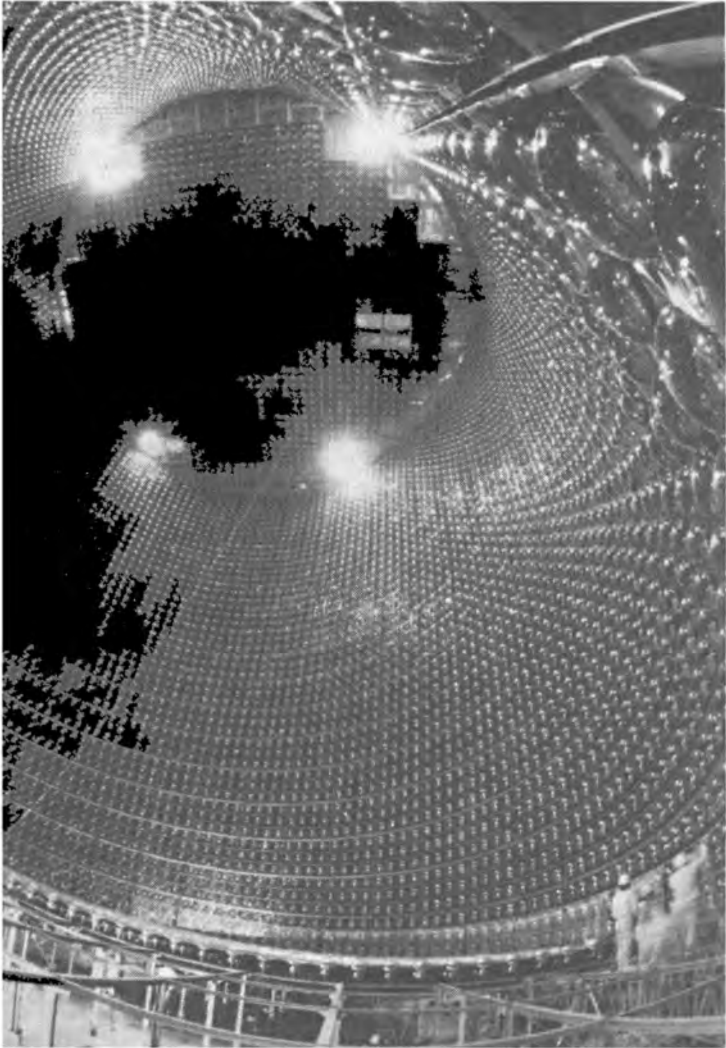
**EINSTEIN:** Peki ya proton? Proton da bozunup örneğin pozitron ve fotona bölünebilir. Bu konu araştırıldı mı?

**HALLER:** Evet, hem de epey bir süre önce. Parçacığın varlığının kanıtlanabilmesi için yerin derinlerine büyük dedektörler kuruldu. Bunların en büyüğü Japonya'da, Toyama'nın güneyindeki Kamioka'da bulunur. Nitekim dedektör de adını bu kasabadan alır. Şu âna dek protonun pozitron ve fotona ya da nötr bir pi-mezonuyla pozitrona dönüştüğü gözlenmedi. Halihazırda $10^{32}$ yıl sınırına gelinmiş durumda.

**NEWTON:** Aklıma yatmadı doğrusu. Bir yerlerde evrenin 14 milyar yıl yaşında olduğunun tahmin edildiğini okumuştum. Bunun aynı zamanda herhangi bir maddenin ömür sınırı olmasını beklerdim. Oysa siz daha uzun bir süreden söz ediyorsunuz.

**FEYNMAN:** Sevgili Newton, burada sadece olasılıkların geçerli olduğu kuantum mekaniksel bir sistemle karşı karşıya olduğunuzu unutmayın. Bir nötronun ömrü yaklaşık 15 dakikadır. Size verdiğim bu sayı, çok sayıda nötronun ortalama bozunma süresidir. Yarım dakika ya da daha kısa sürede bozunan nötronlar da vardır. Kamioka'da tam da bu erken bozunan nötronlar aranıyor. Bunlara talihsiz parçacıklar da diyebiliriz. Bu yüzden tek bir nötron değil, Kamioka havuzunda bulunan yaklaşık $10^{31}$ adet nötron inceleniyor. Bu havuz içinde, proton bozunmasında açığa çıkması muhtemel fotonları algılayacak olan yaklaşık 11 bin PMT foto çoğaltıcı tüple gözlemlenen 50 bin ton saf su bulunmakta. Japonya'da, vaktinden önce bozunacak kadar talihsiz protonlar aranıyor.

**HALLER:** Kamioka'daki büyük dedektörün kurulmasının sebebi, parçacık fiziğinde $10^{31}$ ile $10^{34}$ yıl aralığında bir bozunmanın gerçekleşeceğine dair somut kuramların olması. Bu aralığın alt eşiğini geçmiş durumdayız. Dedektörün gelecekte daha da büyütülmesi planlanmakta. O zaman çok daha fazla sayıda proton incelenebilecek. Ama $10^{34}$ yılı geçmek mümkün olmayacak. Bu zaman aralığının ardından uzaydan gelen nötrinoları etkileyen yeraltı etkileşimleri devreye girecek ve bu etkileşim olası proton bozunmasının sinyallerini örtecek denli güçlü olacak. Neyse, tüm bunlar kuantum kuramının değil, parçacık fiziğinin alanına giriyor. O yüzden bu konuyu bir kenara bırakalım.



Japonya'daki Kamiokande dedektörü.

**NEWTON:** Fiziği alanlara ayırmak da zorlu bir iş doğrusu. Proton bozunmasının keşfi, kuantum fiziği de dahil olmak üzere birçok alan için önemli bir bulgu olacak sanırım. Şahsen, bu konu hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olmak isterim.

**EINSTEIN:** Beyler, saati yine öğlen ettik. Bence yakındaki koruda bir piknik yapalım. Hem yürüyüş de yapmış oluruz. Mutfağa gidip bir piknik çantası hazırlayayım ki bir an önce yola koyulalım.

# 11

# Elektronlar ve Fotonlar

Piknik dönüşü teras yerine Einstein'ın evinin bahçesindeki büyük meşe ağacının altına yerleştirilmiş masaya kuruldular.

**HEISENBERG:** İkindi oturumumuza Wolfgang Pauli ile bendenizin bin dokuz yüz otuzlu yıllarda teklif ettiğimiz bir açılımdan söz ederek başlayalım isterseniz. Aslında bu düşünce Dirac denklemine dayanmakta; siz de bilirsiniz Mr. Feynman, çünkü aynı kuramı kuantum elektrodinamiği adı altında oldukça geliştirdiniz. Hatta Julian Schwinger ile beraber kısa adı QED olan bu kuramı nihayete erdirdiğinizi bile söyleyebilirim. Sizden sonra bu alanda pek ilerleme olmamış anladığım kadarıyla.

Başlamadan önce göreli kuantum mekaniğinde sıkça kullanılan sanal parçacık kavramından kısaca söz edeyim. Şu geçtiğimiz birkaç gün içinde bana ait olan belirsizlik ilkesinden, yer ile momentum arasındaki belirsizlik ilişkisinden sık sık bahsettik. Enerji ile zaman arasında da bir belirsizlik vardır, denklemi de şu şekildedir:

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx h$$

Denklemde anlatılmak istenen, çok kısa süreliğine enerji borçlanabileceğiniz. Bir parçacık çok kısa süreliğine başka bir parçacık olabilir. Dolayısıyla fotonlar birer elektron-pozitron çiftine dönüşebilir ve hemen akabinde yine birleşip bir foton meydana getirir. Gerçekten var olmayıp sadece kısa süreliğine –belirsizlik ilkesinin bir sonucu olarak– ortaya çıktıkları için bunlara sanal parçacık adı verilir. Bunların neden önemli olduklarını ileride göreceğiz.

Elektromanyetik etkileşime dönecek olursak, öncelikle bir Dirac parçacığıyla elektromanyetik alan ya da diğer bir deyişle elektronla elektromanyetik alanın dördüncü potansiyeli arasında bir etkileşim kurduk. Dirac'ın önerdiği yolu izlemiştik aslında. Maxwell'in bizden uzun zaman önce yürürlüğe soktuğu elektromanyetik denklemleri zaten biliyorduk, tek kafa yormamız gereken nokta, bunun parçacıklar, yani elektronlarla etkileşimiydi.

Dirac denklemi, tıpkı Maxwell denklemleri gibi görelilik kuramıyla tutarlılık gösteriyordu. Kuramla uyumlu bir başka etkileşime ihtiyaç vardı. Üzerinde çalıştığımız en yalın etkileşim, elektromanyetik alan potansiyelindeki elektron ve pozitron etkileşimiydi. Elektrik ve manyetik alan gücünü bir potansiyele bağlamak mümkündür; bu potansiyel uzay içerisindeki bir normal vektörden ve zamana atfedilmiş bir başka değerden müteşekkildir. Yani elektriksel ve manyetik alanın altı değerini belirleyen bu dört fonksiyondur. Bu dört fonksiyona dörtlü vektör adı verilirken, görelilik kuramında uzay ile zamanın birleşip uzay-zamanı oluşturmasına atıfta bulunulur.

**EINSTEIN:** Yaptığınız şeyi anladım anlamasına da, neden doğrudan elektronla elektromanyetik alan arasındaki etkileşimi incelemediğinizi merak ediyorum. Potansiyel dediğimiz, gözlemlenemeyen, pek hazzetmediğim bir hayalet değerdir. Buna karşın alan kuvveti gerçek, dolayısıyla bunu doğrudan ölçmek mümkün. Siz ve Pauli bu tuhaf dörtlü potansiyeli kullanma fikrine nereden kapıldınız?

**HEISENBERG:** Açıklaması zor olsa da, dörtlü potansiyeldeki etkileşim daha kolaydı. Ölçülebilirlik meselesiniyse kafanıza çok takmayın derim ben, zira $\psi$ spinörü ile gösterilen Dirac alanı da doğrudan ölçülebilir değil. Elbette alan kuvveti ile $\psi$ arasındaki etkileşimi de gözlemleyebilirdik ama daha basit olan yolu denemek istedik öncelikle. İşe de yaradı, en azından elektronda; protondaysa o kadar şanslı değildik.

Otuzlu yılların başında Wolfgang Pauli, protonun manyetik momentinin nasıl ölçüleceği üzerine akıl yürüten deneysel fizikçilerle alay etti. Protonun bir Dirac parçacığı olduğunu ileri sürdü; manyetik momenti, tıpkı elektrondaki gibi kesin biçimde belliydi. Nötronlar herhangi bir elektrik yüküne sahip olmadıklarından Pauli bunların manyetik momentinin sıfır olması gerektiğini öngördü, zira Di-

rac denklemi uyarınca nötron dörtlü potansiyelle herhangi bir etkileşim göstermemeliydi.

**FEYNMAN:** İşte Pauli bu konuda epey yanıldı, dostum. Günümüzde nükleonların manyetik momentini oldukça kesin biçimde biliyoruz. Protonda söz konusu değer $\mu = 2{,}793\ \mu_N$; burada $\mu_N$ bir Dirac parçacığına tekabül eden manyetik alanı gösterir. Nötronda $\mu = -1{,}9131\ \mu_N$, yani kesinlikle sıfırdan büyük. Bir kuramcıya inanmanın aptalca sonuçlar doğurabileceğine dair çok yerinde bir örnek bu. Neyse ki deneysel fizikçiler Mr. Pauli'ye pek kulak asmamışlar.

**NEWTON:** Proton ve nötronların birer temel parçacık olmadıklarını ve daha küçük kuarklardan meydana geldiklerini söylemiştik. Bu durumda bunlar da Dirac parçacıkları olamaz, değil mi? Proton üç kuarka sahiptir, manyetik momentiyse bir Dirac parçacığının neredeyse üç katı. Anlaşılan nötronda durum biraz daha karışık; nötron da her biri yük sahibi üç kuarktan meydana geliyorsa, manyetik bir momente sahip olması gerekir. Ama nötron ile protonun bu momentleri karmaşık değerlerdir. Bunları kimse hesaplayamaz. Öte yandan kuarkların, Dirac tarafından öngörüldüğü üzere dörtlü potansiyelle normal bir etkileşimi olduğunu tahmin ediyorum.

**HALLER:** Evet, protonda karşımıza çıkan en önemli sorun, kuarklardan meydana geliyor olması. Halihazırda bir içyapısı olduğundan, elektron gibi temel bir Dirac parçacığı değil. Haklısınız Sir Newton, dörtlü potansiyelle normal bir etkileşime geçen aslında kuarklar. Proton ve nötronların manyetik momentinin karmaşık olduğu görüşünüzde de yanılmıyorsunuz.

Tam da yeri gelmişken ünlü Alman matematikçi Hermann Weyl'den söz edeyim. Weyl Heisenberg ile Pauli'nin önerdiği etkileşime yakından baktı ve burada yalın bir simetrinin varlığını gözlemledi. $\psi$ Dirac spinörünü bir karmaşık sayıyla çarptığımızı varsayalım. Temel denklemde hiçbir şey değişmeyecektir. Bu da bizi, matematikçiler tarafından U(1) simetrisi olarak adlandırılan bir simetriye götürür.

**EINSTEIN:** İyi güzel de, o zaman $\psi$ Dirac alanını hem burada hem de örneğin ayda aynı sayıyla çarpmam gerekir. Sizce de bu durum tuhaf değil mi? Aydaki bir Dirac alanının dünyada ne yaptığımızdan nasıl haberi olabilir?



Alman matematikçi Hermann Weyl (1885-1955). Weyl başta elektrodinamiğin ayar türevi biçimi olmak üzere kuramsal fiziğe büyük katkılarda bulunmuştur. Göttingen'deki üniversiteden ayrılmasının ardından 1933 yılında Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde çalışmaya başladı.

**HEISENBERG:** Weyl de böyle düşünmüştü. O yüzden farklı bir simetri denedi. Dirac alanını her yerde $e^{i\lambda}$ karmaşık sayısıyla çarptı; tek fark $\lambda$ sayısının şimdi uzaya ve zamana bağlı olması. Normal Dirac denkleminde böyle bir şey mümkün değildir, çünkü bu durumda $\lambda$'nın türevi imler kullanmak durumunda kalırsınız ve denklem bozulur. Weyl'in kullandığı yöntem, aynı zamanda elektromanyetik potansiyeli de, $\lambda$'nın türevinden çıkan bir im oranında değiştirmekti. Bu durumda ansızın, sanki bir mucize gerçekleşmişçesine her şey yine yoluna girer. Dirac alanının değiştirilmesi, foton alanının değiştirilmesiyle olur. Her iki alan, bir otomobil şanzımanındaki dişliler gibi birbirine uyar. Dirac alanının değiştirilmesine yeniden ayarlama denir. Tarif ettiğim türden bir etkileşim kuramına verilen bir başka ad da ayar kuramıdır.

**FEYNMAN:** Buradaki en önemli nokta, bunun ancak etkileşime sahip bir kuramda mümkün olması. Yani elektromanyetik etkileşime sahip bir kuram, etkileşimsiz olandan daha güçlü bir simetri arz eder – bunun doğru yolda olduğunuza dair Tanrı'nın size verdiği bir işaret olduğunu düşünebiliriz, Herr Heisenberg. Bu tam da elektromanyetik potansiyele sahip etkileşimin kuramıdır. Dirac parçacığı manyetik ve elektriksel alanla doğrudan etkileşim halinde olsaydı, böyle bir şey mümkün olmazdı.

**HALLER:** Elektromanyetik etkileşimin gerçekten de bu şekilde işledi-

ğini artık biliyoruz. Siz Herr Heisenberg ve Wolfgang Pauli, önemli bir adım atıp elektromanyetik etkileşimi kuantum mekaniğiyle birleştirmeyi ya da bugünkü ifadeyle kuantumlamayı başardınız. Bu çalışmanın sonucunda ortaya, benzeri olmayan bir göreli kuantum alan kuramı, kısa adı QED olan kuantum elektrodinamiği çıktı.

**NEWTON:** Kuantumlama dediğiniz, Dirac alanının elektronları, elektromanyetik alanınsa fotonları tarif etmesi. Parçacıklar birbirleriyle etkileşim halinde. Kuram kendi içinde tutarlı mı peki?

**HEISENBERG:** Öyle olduğunu tahmin ediyorduk ama neden sonra bazı sorunlarla karşılaştık. Pertürbasyon, yani bozulma kuramını uygulamaya çalıştık, çünkü hiçbir şeyi kesin olarak hesaplamak mümkün değildi. Bu yöntem kuantum mekaniğinde genellikle çok iyi sonuç verir. Buna göre parçacıklar arasındaki etkileşim, serbest hareketin bozulmasına neden olur ve bozulmanın ardından farklı bir hareket meydana gelir. Bunu matematikteki şu örnekte de görebiliriz:

$$1/(1-x) = 1+x+x^2+x^3+...$$

Burada x ile gösterilen bozulma küçük bir değerse, yöntem son derece başarılı şekilde işler ve problemi çözmek için eşitliğin sağındaki ikinci ya da üçüncü bileşen yeterli olur. Aslında bu denklemde eşitliğin sol tarafını kolayca hesaplamak mümkün, ama QED'de işler daha farklı. Orada sadece pertürbasyon kuramı kullanılabilir.

Bin dokuz yüz ellili yıllarda ABD'de sizin de aralarında olduğunuz araştırmacılar, Mr. Feynman, QED'deki pertürbasyon kuramının temelde tutarsız olduğunu tespit etti. Genç bir fizikçi olarak yapımında çalıştığınız atom bombasının savaşı bitirmesiyle temel araştırmalara geri dönmeye karar verdiniz. O zamanlar Ithaca'daki Cornell Üniversitesi'nde çalışıyordunuz. 1950'de Pasadena'daki Caltech'e geçtiniz.

**FEYNMAN:** Doğru, daha Cornell'deyken elektronun foton alanıyla etkileşiminin etkisini, özellikle de elektronun kütlesi üzerindeki etkiyi hesapladım. Elektronlar kolaylıkla foton yayabilir ve aynı kolaylıkla foton soğurabilir. Bu etki hesaplanabilir ve nihayetinde pek de mantıklı olmayan şu sonuca ulaşılır: Elektronun kendi alanıyla etkileşim halinde olması sonucu kütle üretilir.

**NEWTON:** Neden mantıklı olmasın? Bence harika bir sonuç, zira elek-

tronun kütlesini açıklıyor.

**FEYNMAN:** Böyle düşünmenizin sebebini anlıyorum, ama buradaki asıl sorun elektron kütlesinin sonsuz olması.

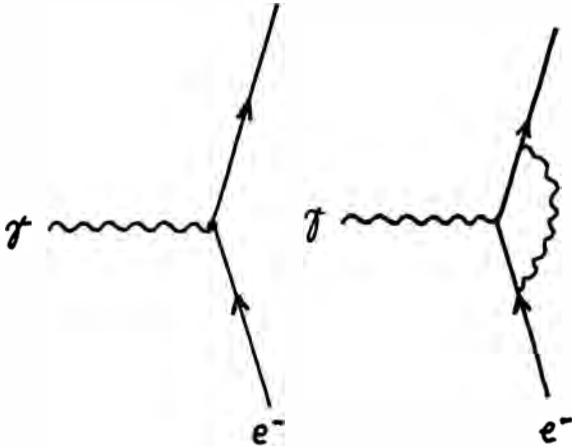
**NEWTON:** Öyleyse kuramınız mantıklı değil demektir.

**FEYNMAN:** Hayır Mr. Newton. Biraz düşündüm ve şu sonuca vardım: Etkileşim olmaksızın bir elektronun kütlesi, kimsenin gözlemleyemeyeceği bir fiziksel değerdir. Ancak ölçebildiğimiz kütlede –enerji birimiyle ifade ettiğimizde yaklaşık 0,5 Mega elektronvolt (MeV)– elektronları görebiliyoruz. Kütlenin gözlemlenen değere uygun hale getirilmesiyle bu sonsuz değerin soğurulabileceğini düşündüm. Elbette hesaplamalar esnasında son derece büyük rakamların çıkması işin güzelliğini biraz bozuyor, ancak sonunda tüm bu büyük değerler birbirini götürüyor. "Yeniden normalleştirme" (renormalizasyon) adı verilen bu sürecin sonunda bu kez elektronun kütlesi hesaplanamaz oluyor. Elektron kütlesi QED'nin serbest bir parametresi ve bunun deneye uygun hale getirilmesi gerekiyor. Dirac'ın pek hoşuna gitmeyen bir durum. Her karşılaşmamızda, her ne kadar işe yarasa da yeniden normalleştirmeden dert yanıyordu.

Yeniden normalleştirmenin başarısı gözardı edilir gibi değildi. Harvard'dan meslektaşım olan Julian Schwinger, etkileşiminin elektronun manyetik alanı üzerindeki etkisini inceledi ve yapılan ölçümlerin Dirac'ın öngörüsüyle örtüştüğünü tespit etti. Dirac, kendi ürettiği denklem tarafından tarif edilen bir parçacığın manyetik momentinin, spiniyle orantılı olması gerektiğini söylemişti: Manyetik moment = (e/m) x spin; burada m elektronun kütlesini ifade eder. Formülün verdiği sonuç gözlemlerle örtüşüyordu. Manyetik moment genellikle g çarpanıyla tarif edilir. Dirac bu çarpanın 2 olması gerektiğini öne sürmüştü. Günümüzde bunun 2,002 319 304 2718 olduğunu biliyoruz.

**NEWTON:** Yani g çarpanı 2'den biraz daha büyük. Aradaki bu küçük fark nereden kaynaklanıyor peki?

**FEYNMAN:** Arnold Sommerfeld 1916 yılında, fotonla elektron arasındaki etkileşimin gücünü, "ince yapı sabiti $\alpha$" dediği bir doğal sayının verdiğini buldu. Bu sayı atomun enerji seviyelerinin ince yapısı hakkında bilgi içerir ve kuantum elektrodinamiğinde tezahür eden bir gelişmeye işaret eder. Görelilik kuramı, kuantum kuramı ve elektrodinamik bu sayede birleştirilmiş oldu, çünkü $\alpha$ sayısı, $4\pi e^2/hc$ for-




Elektronun manyetik momentinin Feynman diyagramı (solda düzeltme olmaksızın, sağdaysa Julian Schwinger tarafından hesaplanmış bozulma kuramının birincil düzeninde).

mülüyle elde edilir. Burada *e*, elektrodinamiği temsilen elektrik yükünü simgelerken, *h* kuantum kuramının temel sabitini, *c* ise görelilik kuramı sabiti olan ışık hızını ifade eder. Deneyler $\alpha$ sayısının $^1/_{137}$, yani 0,01'den bile küçük olduğunu ortaya çıkardı. Her ne kadar bu sayıyı tam olarak hesaplamak mümkün olmasa da, günümüzde $\alpha = {}^1/_{137,035.999.76}$ değerine ulaşılmış durumda.

Schwinger manyetik momentin, Dirac'ın bulduğu değerden az da olsa sapması gerektiğini hesapladı ve $2(1+\alpha/2\pi)$ sonucuna ulaştı. Binde 1,2'lik böyle bir düzeltmeye ışıma düzeltmesi denir. Akabinde yapılan ölçümler tam olarak Schwinger'in hesapladığı değeri verdi. Az önce bahsettiğimiz g çarpanının 2 sayısından sapma miktarı, birincil düzende Schwinger'in hesapladığı sapmayla aynıydı.

**HALLER:** Kuantum elektrodinamiği gibi taze bir araştırma alanı için büyük bir başarı. Bozulma kuramıyla çalışıldığı takdirde kuramın doğru çıktığı anlaşılmış oldu. Devamında başka başarılara da imza atıldı.

Schwinger 1'den sapmayı kolaylıkla buluyordu. Bunun için giren elektrondan çıkan elektrona geçiş yapan sanal bir fotonun oluşturduğu düzeltmeyi hesaplıyordu. Tüm bu süreci sizin geliştirmiş olduğunuz bir diyagramla göstermek mümkün, Mr. Feynman.

**NEWTON:** Schwinger bu diyagramı mı hesapladı?

**FEYNMAN:** Hayır. Schwinger'in benim diyagramlarımdan haberi bile yoktu. Sonrasında da onlardan söz ettiğini hiç işitmedim, çünkü onları pek sevmezdi. Hesaplama yapmak için kendine özgü karmaşık bir yolu vardı.

Murray Gell-Mann, izinli sömestrinde Harvard Üniversitesi'ne gitti ve yine aynı dönemde Avrupa'ya seyahat etmiş olan Schwinger' in evine yerleşti. Schwinger evi Gell-Mann'a bırakmadan önce özel eşyalarını bir odaya doldurup kapısını da kilitlemişti. Gell-Mann bu evde bir parti düzenlediğinde o kilitli kapının üzerine tebeşirle şöyle yazmış: Burası Schwinger'in Feynman diyagramlarını gizlediği oda.

Bu şaka sonradan kendisine anlatıldığında Schwinger bayağı öfkelenmiş. Küstahlık addettiği bu davranışı yüzünden bir daha asla Gell-Mann'la konuşmamış. Yetmişli yıllarda Harvard'dan, Pasadena' nın yakınındaki California Üniversitesi'ne geçtiğinde sık sık buluşur olduk.

O zamanlar elde ettiği sonuçları ilk olarak 1947 yılında, New York'un doğusundaki Shelter Island'da tertiplenen küçük toplantıda sergiledi. Zorlu bir hesap oldu, Schwinger'in sonuca ulaşması bir saatini aldı. Toplantıya ben de katılmıştım. Akşam otel odama çıktığımda aynı hesabı kendi yöntemimle tekrarladım ve birkaç dakikada sonuca ulaştım. Yöntemim Schwinger'inkinden daha hızlı, daha yalındı. Ertesi sabah sonucu meslektaşlarımla paylaştığımda onların yüzlerinde gördüğüm şaşkınlık yeni bir şey keşfetmiş olabileceğimi düşündürdü bana. Ben de hesabımı *Physical Review*'da yayımlattım.

**HALLER:** Her ne kadar Schwinger pek hoşlanmasa da Feynman diyagramları son derece faydalıdır. Onlar olmadan kuantum alan kuramındaki atılımları yapmak mümkün olmazdı. QED'de artık her şey hesaplanabilir. Elektronun manyetik momenti, örneğin iki sanal fotonun alışverişi gibi üst düzenden, $\alpha^2$ düzeninden katkılarla elde edilebilir. Sonuç, $\alpha$'nın kuvvet serisinde şu şekilde gösterilebilir:

$$\alpha/2\pi + Ba^2 + Ca^3 + Da^4 + \ldots$$

B ve diğer katsayıları da buna göre hesaplamak gerekir.

**EINSTEIN:** Elektronun manyetik momenti kesin biçimde ölçüldü dediniz. Kuram ne kadar iyi işliyor peki?



Shelter Island toplantısı esnasında bir tartışma.
Ortada Richard Feynman, hemen sağında Julian Schwinger.

**HALLER:** Bundan daha iyi işleyemezdi. Kuram ile deney arasında, bire 10 milyon oranında bir tutarlılık var. Doğabilimlerinde bugüne kadar kuram ile uygulama arasında elde edilmiş en yüksek oran bu.

**NEWTON:** Vay canına. Herhalde QED'nin gerçekten de doğru olduğunu kabul etmemiz gerekecek. Kuantum mekaniği ve Einstein'ın göreliliği, hesaplamalarda ortaya çıkan sonsuz değerleri çöpmüş gibi elinin tersiyle bir kenara süpüren Feynman'ın biraz kaba yöntemiyle birleştiğinde ortaya bu harikulade sonuç çıkıyor. Herr Heisenberg, Wolfgang Pauli'yle beraber muhteşem bir çalışma yapmışsınız; Mr. Feynman, siz de QED'yi hesaplanabilir hale getirmişsiniz. Hepinizi tebrik ederim.

**HALLER:** QED bugüne kadar en iyi işleyen kuram. Gerçi artık QED'nin bağımsız bir kuram olmadığını biliyoruz, çünkü 100 GeV civarındaki çok yüksek enerjilerde, zayıf çekirdek etkileşimini de içeren, daha büyük bir kuramın parçası olduğu anlaşıldı. Ama isterseniz konuyu daha da genişletmeyelim.

**NEWTON:** QED kuramının, sizlerin de bildiği üzere iki parametresi

var: elektron kütlesi ve ince yapı sabiti. Bu sabitler hakkında QED kapsamında bir şeyler söylemek mümkün mü? Özellikle boyutsuz bir değer olan ince yapı sabitini hesaplayabilmek gerekmez mi?

**HALLER:** Elektron kütlesi bir kütle parametresi olmasına karşın, QED' de bir veri olarak kullanılamaz. Örneğin bir elektronun kütlesinin 0,511 MeV olduğunu ifade edersem, tamamen QED dışında bir değer vermiş olurum, zira MeV birimi sadece makroskobik dünyaya aittir ve QED içinde tanımlı değildir. Burada önemli olan nokta, kütlenin sıfıra eşit olmaması. Kullanılabilecek tek parametre, ince yapı sabiti, yani 137 değeridir. Birçok fizikçi bu sayı üzerine kafa yordu.

**HEISENBERG:** Doğru. Wolfgang Pauli sürekli 137 sayısını düşünüyordu. 58 yaşında Zürih'teki Kantonsspital Hastanesi'nde hayata gözlerini yummadan bir gün önce eski asistanı Victor Weisskopf onu ziyaret etmişti. Vedalaşmalarının ardından Pauli'nin odasından çıktığında şaşkınlıkla kapının üzerindeki oda numarasını gördü. Pauli 137 numaralı bir odada hayatla vedalaşmıştı. Tesadüf mü? Tahminimce bu yine Pauli usulü bir şaka olmuş.

**HEISENBERG:** Kesin olan 137 sayısının gizemini halen sürdürdüğü. Kimse bu sayının tam olarak nasıl hesaplanacağını bilmiyor.

**HALLER:** Dostum Murray Gell-Mann ince yapı sabiti hakkında farklı bir görüş öne sürdü. Ona göre ince yapı sabitinin 137 olması kozmik bir tesadüf olabilirdi. Evrenimiz 14 milyar yıl önce Büyük Patlama' yla meydana geldiğinde elektron ve kuarklardan müteşekkil son derece sıcak bir karışımdı. İnce yapı sabiti, bu sıcaklıklarda sürekli değişiyordu. Evren sürekli genişleyerek soğurken sabit de tesadüfi bir değerde, yani bugünkü değerinde "kalakaldı".

**EINSTEIN:** Büyük Patlama bugün yeniden gerçekleşse, bu değer başka olacak yani.

**HALLER:** Evet, bu sabit kozmik bir tesadüf, o kadar. Her büyük patlama farklı bir sabit değer meydana getirir.

**FEYNMAN:** Bir defasında, $\alpha$ örneğin $^{1}/_{140}$ ya da $^{1}/_{134}$ gibi farklı bir değere sahip olsa evrenimizin bugünkünden farklı olacağını okumuştum.

**HALLER:** Hem de çok farklı bir yer olurdu. Sabit şimdiki halinden biraz sapma gösterse, yaşamı oluşturan makroskobik moleküllerin bazıları oluşmaz, burası da bizim bildiğimiz anlamda yaşamın süremeyeceği başka bir evren olurdu.

**EINSTEIN:** Yani yaşam ile ince ayar sabitinin değeri arasında yakın bir ilişki mi var? Eğer öyleyse gerçekten de tuhaf bir ilişki bu.

**HALLER:** Gell-Mann birçok başka fizikçi gibi Büyük Patlama'nın bir kez değil, sayısız defalar oluştuğu görüşünde. Evren aslında, sonsuz sayıda büyük patlamanın yaşandığı bir çokluevren, her evrenin de kendi ince yapı sabiti var. Bunlardan biri de tesadüfen $\alpha^{-1} = 137$ olmuş. Evrenler arasında sadece burada bizim bildiğimiz anlamda yaşam meydana gelmiş. Sadece bu evrende Wolfgang Pauli ya da Richard Feynman gibi ince yapı sabiti hakkında akıl yürüten adamlar var. Böyle bir açıklama, 137 sayısıyla yaşamın bu kadar birbirine uymasını açıklayabilir. Salt tesadüf.

**EINSTEIN:** Buyrun, işte yine tesadüften bahsediyoruz, kuantum kuramında tesadüften geçilmiyor. Siz sormadan söyleyeyim, İhtiyar'ın ince ayar sabitini de zar atarak bulduğuna katılmıyorum.

**NEWTON:** Herr Einstein, Tanrı'yı bir kenara bıraksanız artık. Tesadüfün varlığını kabullenmek, ince yapı sabitini hesaplamaya kalkmanın anlamsız olduğu anlamına geliyor. Sabit sadece bir tesadüfe dayanıyor – Gell-Mann belki de haklıydı. Bu sabiti kimse hesaplayamayacak, siz bile Herr Einstein. Hatta sizin İhtiyar da öyle.

**HALLER:** Evet, Einstein'ın hoşuna gitsin gitmesin, durum bu. Nitekim bu açıklama nasıl olup da bugüne kadar bu sabit hakkında herhangi bir şey bulamadığımızı da açıklayabilir – bulacak bir şey yok, zira her şey bir tesadüften ibaret.

**EINSTEIN:** İtiraf ediyorum ki fiziğin gittiği yönden pek hoşlanmadım. Bugün meslek seçsem fizikçi olmak yerine bir deniz fenerinde bekçilik yapardım.

**HEISENBERG:** Âlemsiniz Einstein, siz ve deniz feneri bekçiliği. Kaptan olmak istemezdim doğrusu, işim sizin fenerinize kalacaksa. Canıma susamadım doğrusu.

**HALLER:** Sevgili Herr Einstein; ben sizi bir fizikçi olarak daha çok beğeniyorum. Fener bekçiliği size pek uygun bir meslek değil sanırım. Akşam yemeği vakti geldi. Sizin için de uygunsa yine Potsdam'a inmeyi öneriyorum.

Az sonra taksilere yerleşmiş, Potsdam'daki Alte Post restoranının yolunu tutmuşlardı.

# 12

# Kuantumlar ve Renkli Kuarklar

Bir sonraki gün yine Einstein'ın evinin terasında bir araya geldiler.

**EINSTEIN:** Atomların fiziğini QED'nin kuantum alan kuramıyla tarif etmek mümkün. Benim ortaya attığım görelilik kuramı, elektromanyetizma ve kuantum mekaniğiyle birleştirildiğinde, ortaya doğabilimlerinin herhalde en başarılı kuramı olan QED çıkıyor. Aynı zamanda atomların kuramı bu. Günümüzde proton ve nötronların temel parçacıklar olmadıklarını ve aslında kuarklardan meydana geldiklerini biliyoruz. Atom fiziğinde sadece bu bilgiyle yetinmek mümkün, zira kuarklar bu fizik açısından önemli değil. Ne var ki ben nükleonları anlamak istiyorum. Nükleonlar için bir kuram geliştirildi mi? Düşününce, görelilik kuramı ve kuantum mekaniğine bir şey daha eklersek bu konuda bir fikir yürütebiliriz diye tahmin ediyorum. Ne dersiniz Mr. Feynman, nükleon ve etkileşimleri konusunda tutarlı bir kuram var mı?
**FEYNMAN:** Evet, gerçekten de bu konuda yeni bazı fikirler var ve bunlar kuantum mekaniği açısından da son derece ilginç. Temel parçacık fiziğinin bin dokuz yüz ellili yıllarda gelişmeye başlamasıyla sürekli yeni, temel parçacıklar oldukları düşünülen parçacıklar keşfedildi; önce pi-mezonlar ve k-mezonlar, ardından hiperon gibi daha ağır parçacıklar. En nihayetinde parçacık fizikçileri, bu yeni fenomenlerin, özellikle de çekirdek parçacıkları arasındaki güçlü etkileşimin doğurduğu fenomenlerin ancak yeni model ve düşünce biçimleriyle anlaşılabileceği sonucuna vardı. Bunun nasıl yapılacağı-

nıysa kimse bilmiyordu. Başta ABD'den Murray Gell-Mann ile İsrail'den Yuvan Ne'eman'ın 1961'de önerdiği SU(3) simetrisi olmak üzere yeni türden simetriler ortaya atıldı.

1964 yılına gelindiğinde Gell-Mann ile George Zweig birbirlerinden bağımsız olarak çekirdek parçacıklarının, kuark adı verilen daha küçük temel parçacıklardan meydana geliyor olabileceğini öne sürdüler; vakti zamanında pek sesini duyuramamış bir düşünceydi bu. Gell-Mann bu kuarklar yardımıyla SU(3) simetrisini de kolayca açıklayabiliyordu. Aralarında benim de yer aldığım çok sayıda fizikçi tüm bunların saçma olduğunu düşünüyordu. Bugün dönüp baktığımızda büyük bir devrim olduğu ayan beyan anlaşılıyor tabi; Gell-Mann yazdığı kısa metni, az sonra değineceğim kuarkların acayip yükleri nedeniyle *Physical Review Letters*'a göndermekte önce tereddüt etti. Dergideki uzmanların çalışmasını reddedeceğine neredeyse emin olduğundan Avrupa'daki *Physics Letters*'ı tercih etti. Her ne kadar çalışması burada da mantıksız olarak nitelense de, CERN'in baş fizikçisi, Gell-Mann'ı saygın bir bilimadamı olarak tanıdığını, bu nedenle de çalışmasının basılması gerektiğini savundu. Nihayetinde bu kısa metin, *Physics Letters*'da yayımlanmış en önemli makale oldu.

Gell-Mann'ın öğrencisi olan George Zweig, doktorasını verdikten sonra gittiği CERN'de, "aslar"* adını taktığı kuarklar hakkında ayrıntılı bir çalışma kaleme aldı. O günlerde CERN'deki genel geçer kural, herkesin çalışmalarını mutlaka Avrupalı bir bilim dergisinde yayımlatmasıydı. Zweig bu kurala karşı çıkınca, makalesini ABD'de yayımlatması yasaklandı. Zweig bunun üzerine metni yayımlatmaktan tamamen vazgeçti – ki bu büyük bir hataydı. Çalışmanın ilk ortaya çıkmasından kırk yıl sonra bile, Zweig'ın makalesine ancak CERN'in *preprint* tabir edilen baskı öncesi formatında kayıtlı halde ulaşılabiliyor.

**NEWTON:** Peki kuark modeli protonu nasıl açıklıyor? Hazır söz almışken, kuarkların neden bu acayip yüklere sahip olduğunu da sorayım bari.

**FEYNMAN:** Proton ve nötronlar için iki farklı kuark teklif edildi. Gell-Mann bunlara İngilizcedeki *up* ve *down* sözcüklerine uygun olarak

* Zweig bu adı koyarken iskambil kâğıtlarındaki aslardan ilham almıştı, zira dört çeşit kuark olduğunu düşünüyordu. –*y.n.*

yukarı için "u", aşağı içinse "d" adlarını verdi. Bu adlandırmayla proton (uud), nötronsa (ddu) yapısına sahipti. Buradan yola çıkarak kuarkların yüklerini kolayca hesaplamak mümkün: 2Q(u) +X(d)=+1, Q(u)+2 Q(d)=0. Dolayısıyla Q(u) = $^2/_3$, Q(d) = $-^1/_3$ sonuçları çıkar. Bunlar gerçekten de acayip yüklerdir. Gell-Mann'ın makalesini *Physical Review Letters*'a göndermekten çekinmesine şaşmamak gerek. Ben de büyük olasılıkla aynı şeyi yapardım.

**HALLER:** Kuark yükleri alışıldığın dışında gerçekten de. Kuark modelinin başta bu kadar tepki görmesinin en önemli sebebi de buydu zaten. Oysa nükleonların içinde kuarkların olduğu artık bilinen bir gerçek. Acayip yükleri de, elektron ışınlarıyla yürütülen deneylerle dolaylı yoldan kanıtlandı. Alanın en önemli deneyleri Stanford'daki SLAC'ta yürütüldü.

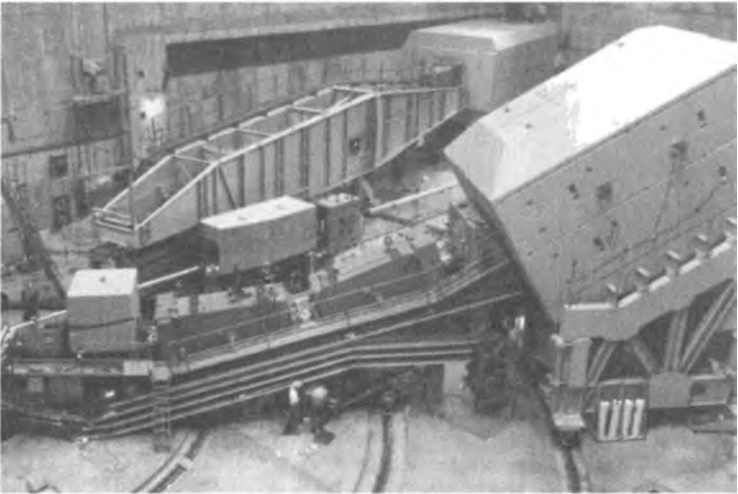
Sekiz yıl sonra, 1972'de Gell-Mann ve genç Alman meslektaşı Harald Fritzsch, ilk kez QED'ye benzer basit bir alan kuramının güçlü etkileşim fenomenlerini açıklayabileceğini dile getirdi. Günümüzde kuantum kromodinamiği olarak adlandırılan bu kuram genel kabul görmüş ve çok sayıda deneyle kanıtlanmıştır. Üstelik kuantum kuramına yenilikçi bir bakış açısı getirmektedir. Burada söz konusu olan görelilik kuramı ve kuantum kuramının QED'deki gibi elektromanyetizmayla değil, yeni bir kuark renk kuramıyla birleştirilmesi; sanırım bu konuya daha ayrıntılı değinmemiz kaçınılmaz.

**NEWTON:** Renk kuramı mı? O da ne! Kuarkların bir de rengi mi var?

**FEYNMAN:** Alıştığımız anlamda renk değil bunlar elbette. Elektronlarla yapılan saçılma deneyleri sayesinde kuarkların, nükleonların içinde yer alan yapısız kuantumlar olarak keşfedilmesinden önce, başka bir tuhaf özellikleri ortaya çıkmıştı. Gell-Mann ile Zweig'ın ortaya attıkları basit kuark modeline göre nükleonlar üç kuarktan müteşekkil basit birer sistem olarak yorumlanmıştı. Daha ellili yıllarda yürütülen deneylerde protonun, sadece kısa süreliğine var olabilen ve $^3/_2$ spine sahip uyarılmış halleri olduğu keşfedilmişti. Delta parçacığı adı verilen bu proton hallerinden bir tanesine, 1230 MeV'lik bir kütleye ve ikili elektrik yüküne sahip olan Δ++ parçacığına değinmek istiyorum. Kuark modeline göre bu nesne, üç u-kuarktan müteşekkil bir yapıya ve her kuarktan aldığı $^2/_3$ spinle toplamda 2 spine sahip olmalıydı. Üç kuarkın da spini aynı yönü gösterirse buna ilave olarak



Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi (SLAC).



Kuarkların bulunmasını sağlayan deneylerin yürütüldüğü
SLAC'taki parçacık dedektörü.

$^3/_2$ spinli bir sistem daha elde ederiz. Her şey simetrik (uuu) ve tümünün de spini yukarı doğrudur.

**HEISENBERG**: Ama şimdi bir sorunla karşı karşıyayız. Parçacık salt u-kuarklardan oluşuyor; bu da yetmezmiş gibi hepsinin de spini aynı yönde. Bu durum Pauli ilkesiyle çelişmiyor mu, zira kuarklar $^1/_2$ spinleri nedeniyle fermiyon, değil mi?

**FEYNMAN**: Kesinlikle. Kuarklar da $^1/_2$ spinli diğer nesne ve parçacıklar gibi Pauli ilkesine boyun eğmek zorunda. İlke, kuantum mekaniğinde birleşik bir sistemde, iki nesnenin yer değiştirmesi durumunda oluşan halin daima karşı-simetrik olması gerektiğini, yani aynı yükte olunamayacağını söyler. Az önce bahsettiğim örnekteyse tam bir simetri söz konusu.

İzninizle bu ilkeyi bir örnek üzerinden açıklamak istiyorum. A ve B bileşenlerinden meydana gelen bir AB halini ele alalım. Şimdi bileşenlerin yerini değiştirirsek BA'ya, yani başka bir duruma ulaşırız. A ve B nesnelerinin her birinin $^1/_2$ spini olsa, Pauli dışlama ilkesi doğada ne ilk ne de ikinci halin var olamayacağını, onların yerine sadece (AB – BA) olabileceğini söyler. A ve B'nin yer değiştirmesiyle bu halin işareti değişir ve karşı-simetrik olur. Öte yandan (AB + BA) hali simetrik olacaktır. Pauli yasağı uyarınca buna izin verilmeyeceğinden evrende bu hale rastlanmaz. Pauli yasağı kuantum fiziğinin ince bir ayrıntısı olmakla beraber, kuantum mekaniğinin atom fiziği için önemini bildiğimizden Pauli ilkesi olmadan atomları anlamamızın mümkün olmadığını söyleyebiliriz.

Peki bu ilkeyi kuarklara nasıl uygulayacağız? Kuark modeli içinde $\Delta$++ parçacığının yapısı (uuu)'dur. İki kuarkın yer değiştirmesiyle hiçbir değişiklik olmaz ve sorun da burada yatar. Üstüne üstlük bir de bu hal simetriktir. Yani doğada var olmaması gereken bir durum. Dolayısıyla basit kuark modeliyle deney arasında daha baştan bir çatışma vardır. Gerçekten de kuark modelinin önceleri fizikçiler tarafından bu kadar hararetle reddedilmesinin nedenlerinden biri de bu problemdi.

Çözüm 1971 yılında Fritzsch ve Gell-Mann tarafından bulundu. Öncesinde Oscar Wallace Greenberg ile Moo-Young Han ve Yoiçiro Nambu tarafından benzer yönde öneriler getirilmişti. Kuarklara elektrik yükleri ve spinlerinin dışında bir başka nitelik, bir tür endeks ya da yeni bir yük vermenin doğru olacağı ortaya çıktı. Fritzsch ve Gell-



Murray Gell-Mann (sağda) ve Harald Fritzsch 1995 yılında Berlin'de.

Mann buna renk adını verdi. Elbette burada bildiğimiz anlamda renkten bahsetmiyoruz.

Bir u-kuarka bakalım. Bunun elektrik yükü $^2/_3$, spiniyse $^1/_2$'dir. Bu yeni yük sayesinde u-kuark üç farklı biçimde tezahür edebilir; bunlar 1, 2 ve 3 ya da a, b ve c gibi endeksler veya renk alegorisinden hareketle kırmızı, yeşil ve maviye tekabül eden R, G ve B harfleriyle adlandırılabilir. Renklerin devreye girmesiyle üç u-kuarktan yeni haller oluşturma imkânı doğar. Yani (RRR) olarak yazılan bir hal, üç kırmızı u-kuarktan meydana geliyordur. Ne var ki bir kez daha Pauli dışlama ilkesine aykırılık söz konusudur, zira iki kuarkın yer değiştirmesi yine simetrik bir halle sonuçlanacaktır. Karşı-simetrik olan tek bir hal vardır: (RGB – RBG + BRG + BGR + GBR – GRB). İki kuarkın yer değiştirmesi durumunda karşı-simetrikliğin süreceği bu halde her üç renk de aynı oranda bulunmaktadır. Hiçbir renk iltimaslı olmamasına karşın hal karşı-simetriktir.

**NEWTON:** Üç renk olması gerektiğini nereden biliyoruz? Belki iki renkle de olur, belki de dört renk vardır.

**HALLER:** Hayır, üç renk olmak zorunda, zira protonun üç kuarktan meydana geldiği biliniyor. İki renk olsaydı proton için iki, dört olsa toplam dört kuark gerekirdi. Nitekim Gell-Mann da 1964 yılında protonun neden üç kuarktan meydana gelmesi gerektiğine şaşırmıştı. Artık açıklama önündeydi. Kuarkların üçlü yapısının nedeni yeni

bir simetri, bir renkler simetrisiydi. Protonun üç kuarktan oluşmasının nedeni, üç farklı renk olması. Burada önemli bir rol üstlenen simetri, Ne'eman ve Gell-Mann'ın hadronları sınıflandırmak için 1961 yılında kullandıkları SU(3) matematik grubuyla açıklanır.

Ardından yeni bir şey keşfedildi. Fritzsch ile Gell-Mann, nötr pionun bozunumunu daha ayrıntılı incelerken kuarkların kesin olarak üç renkten müteşekkil olduklarını buldu. Nötr pion, elektromanyetik süreç nedeniyle çok hızlı bozunur. Sürecin şiddeti renklerin sayısına bağlıdır. Hiçbir renk yoksa da süreci hesaplamak mümkündür, ancak bu durumda pionun bozunum oranı 9 kat daha küçük çıkar. Başlarda kuark modeline karşı çıkmak için kullanılan argüman da buydu. Tam olarak üç renk varsa, oran 3 x 3 = 9 kat artar ve deneyle tam bir örtüşme ortaya çıkar. Bundan iyisi Şam'da kayısı. Renk konusunun ciddiye alınması koşuluyla, kuark modeli için gerçekten de büyük bir başarıydı bu.

**EINSTEIN:** Renk kuantum sayısının tedavüle girmesi, bir anlamda Pauli ilkesinin geçerliliğini kanıtlıyor yani. Tıpkı QED ve atom fiziğinde olduğu gibi, Pauli ilkesi olası bir durumun olup olmaması üzerinde söz sahibi. Yukarıda bahsettiğimiz üç kırmızı kuarktan meydana gelen hal söz konusu olduğunda Pauli ilkesinin söylediği açıktır: Mümkün değil. Öte yandan tüm renkli kuarkların bulunduğu ve işaretlerinin de tuttuğu durumlarda, ilke bunun mümkün olduğunu söyler.

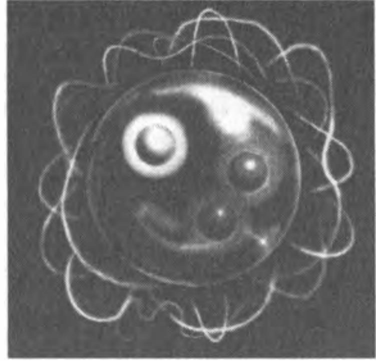
**HALLER:** Aynen öyle. Fiziksel birer parçacık olan kuarkların halleri SU(3) grubuna ait singuletler*, yani renklerin birbirini tamamladığı durumlardır. Kimi zaman buna beyaz hal adı da verilir.

Renklerin rotasyonu, QED'nin faz rotasyonuyla benzerlik taşıyan bir simetri içerir. Fritzsch Doğu Berlin'deyken kütleçekimi üzerinde çalışmıştı. O dönemki profesörü, kütleçekimine hazırlık olması bağlamında Yang-Mills kuramıyla da ilgilenmesini salık vermişti.

**EINSTEIN:** Kendimi kütleçekimi uzmanı sayarım ama bir Yang-Mills kuramından bahsedildiğini hiç duymadım açıkçası.

**FEYNMAN:** Size kesinlikle hak veriyorum. 1954 yılında fizikçi Çen Ning Yang ve meslektaşı Robert L. Mills, sizin de tesadüfen aynı zamanlarda bulunduğunuz Princeton'da güçlü etkileşimi inceliyor ve izospin simetrisine temel bir anlam kazandırmaya çalışıyordu. Bu

* Moleküllerde, toplam spini sıfır olan durum dizgesi. *–ç.n.*



Proton üç renkli kuarktan meydana gelir.

esnada izospin simetrisine, elektrodinamikteki ayar simetrisi gibi yaklaşmaya karar verdiler. Bunun için proton ve nötronlarla özgül bir etkileşim tepkisi verecek yepyeni kuvvet parçacıklarının varlığı gerekiyordu. Ancak iki bilimadamı kuvvet parçacıklarına kütle kazandıramadı. Dolayısıyla bu model gerçekçi değildi, çünkü foton hariç proton ve nötronlarla etkileşim halinde olan kütlesiz parçacıklar olamazdı. Yang ile Mills'in buna rağmen yayımladıkları kuramlarına kısaca Yang-Mills adı verildi; bugün bunu ayar kuramı adıyla biliyoruz.

Wolfgang Pauli de kurama büyük katkı sağladı; Princeton'a gönderdiği mektupta kuramın ana hatlarını daha Yang ile Mills'in yayınından önce çıkarmıştı. Ne yazık ki ikili, mektubun içeriğini bilmelerine karşın çalışmalarında Pauli'nin adını anmadı. Yani kurama aslında Pauli-Yang-Mills kuramı denmeliydi.

Fritzsch de Yang-Mills kuramını yakından tanıyordu ve benzer bir kuramı renk alanı için geliştirmeyi önerdi. Gell-Mann başta bu düşünceden pek hoşlanmadı, ama üzerinde biraz düşündükten sonra aslında kulağa geldiği kadar çılgın olmadığını gördü. Bu sayede kütlesiz kuvvet parçacıkları sorunu ortadan kalkıyordu, çünkü buradaki temel ilke, renk parçacıklarının serbest değil, ancak sürekli bağ halinde var olabileceklerini öngörüyordu. Dolayısıyla sadece kuarklar değil, kuvvet parçacıkları da bu sisteme dahildi.

1972 yılına gelindiğinde Fritzsch ile Gell-Mann, QED'dekine benzer bir ayar kuramının renkler için de geliştirilmesini teklif etti. Kuramlarına kuantum kromodinamiği ya da kısaca QCD adını ver-

diler. Fotona paralel olarak kuarklar, toplamda sekiz adet yeni ayar bozonuyla da etkileşime giriyordu artık.

Başlangıçta kurama karşı duyulan kuşku büyük olduğundan çok az fizikçi QCD'yle ilgilendi. Yetmişli ve seksenli yıllarda QCD'nin, çekirdek parçacıklarının içinde yer alan kuarkların dinamiğini tutarlı biçimde açıkladığı gözlemlendi. Günümüzde QCD, güçlü etkileşimi açıklamaya yarayan yegâne kuram kabul ediliyor, zira tüm deneyler kuramı destekler nitelikte sonuçlar üretiyor. Üstelik henüz herhangi bir alternatifi de yok.

Elbette buradaki renk kavramını kelimenin ilk anlamıyla almamak gerek. Gell-Mann önce kırmızı, beyaz ve mavi renkleri kullanmak istemişti; o zamanlar Cenevre'nin yakınında, Jura Dağları'nda küçük bir Fransız kasabası olan Gex'te yaşadığından Fransa'nın ulusal renklerini seçmişti. Bunun dışında Fransa'yı, Fransa tarihini ve özellikle de Fransız mutfağını pek severdi. Nihayetinde kırmızı, yeşil ve maviyi öneren Fritzsch'in dediği oldu, çünkü beyaz gerçek anlamda bir renk değildir. Adı geçen üç renk optik olarak karıştırıldığında ortaya beyazın çıkmasının faydalı bir bilgi olduğuysa sonradan anlaşılacaktı.

**NEWTON:** Tamam işte! Demek ki renk kavramının bu tuhaf özelliği, kuarkların serbest parçacık olarak var olamamasıyla alakalı.

**HALLER:** Dediğiniz gibi kuarkların ve örneğin iki kuark gibi farklı kombinasyonların doğada var olamaması kolayca anlaşılabiliyor. Kuramın getirdiği kural, renk simetrisi altında fiziksel parçacıkların birer singulet olması – ki bu da renklerin ortalanması anlamına gelmekte. En basit konfigürasyonda biri kırmızı, biri yeşil, diğeriyse mavi olmak üzere üç kuark bulunur. Bu üç renk karıştırıldığında malumunuz olduğu üzere ortaya beyaz çıkar. Bunu iki kuarkla elde etmeniz mümkün değil. Ne var ki beyaza ulaşmak için başka yollar da mevcut. Karşı-kuark ile kuarkların karışımı, örneğin "karşı-kırmızı" + "karşı-yeşil" + "karşı-mavi" kombinasyonu tam olarak karşıkuark - kuarkının, yani pi-mezon gibi mezonların halini oluşturur. Anlayacağınız üzere buradan sadece "kuark-kuark-kuark" ya da "karşı-kuark - kuark" halleri elde edilebilir, "kuark - kuark" ya da başka bir hal değil. Elbette "kuark - kuark - kuark - karşı-kuark - kuark" ya da altı kuarktan müteşekkil daha karmaşık kombinasyonlar da var.

Daha da ayrıntıya girmeden önce QED ile QCD arasındaki temel

farktan söz etmekte fayda var. Bu fark yapının temelinde yatan simetriyle alakalı. Aslında oldukça basit olan QED'nin ayar simetrisi, faz rotasyonlarının simetrisidir. Örneğin önce 30 derece rotasyon yapılır, sonra 10 derece geri dönülür, tekrar 37 derece ileri vb. Rotasyon daima bir sayıyla, yani ilgili açıyı veren bir parametreyle tarif edilebilir. Arka arkaya iki rotasyon yapılacaksa, örneğin önce 10 derece, ardından 30 derece, toplam 40 derecelik bir rotasyon yapılmış olur. Önce 30, ardından 10 derece çevrilecek olursa, toplamda yine 40 derecelik bir rotasyon elde edilir. Sonuçlar dönüşümlerin sıralamasına bağlı değildir. Matematikçiler buna Abel simetrisi adını verir; simetriye adını veren Niels Henrik Abel, 19. yüzyılda yaşamış ve adı matematik dilinde yeni bir sıfat olma onuruna erişmiş Norveçli bir matematikçidir.

Ancak renk simetrisi o kadar da basit değildir. Zorluğunu anlamak için geometriden bir örnek vereyim. Tek düzlemde, yani iki boyutlu bir uzayda yapılan dönüşler Abel simetrisine tekabül eder. Yeni bir boyut eklediğimizde simetri de, üç boyutlu uzaydaki dönüşleri kapsayacak şekilde genişler. Artık birbirinden bağımsız üç farklı dönüş vardır: x, y ve z eksenleri etrafında. Uzay içerisinde herhangi bir dönüş hareketi, bu üç parametreyle tanımlanabilir. Dönüşler arzu edildiği şekilde kombine edilebilir. Örneğin x ekseni etrafında 10 derecelik bir dönüş yapılır, ardından buna y ekseni etrafında 20 derecelik bir dönüş eklenir ya da x ekseninde 20, ardından y eksenin 10 derecelik bir dönüş yapılır. Her iki durumda da üç boyutlu uzayın rotasyonu söz konusudur.

Ancak küçük bir deney ya da basit bir hesaplamayla, iki dönüş dizisinin oluşturduğu sonuçların aynı olmadığı, z ekseni etrafındaki dönüşleriyle birbirlerinden ayrıldıkları ortaya çıktı. Bu durumda dönüşlerin sıralaması da ansızın önem kazanır. Böylesi bir simetriye Abelci olmayan simetri denir ve buna dayanan bir ayar kuramı Abelci olmayan ayar kuramı ya da Yang-Mills kuramı adını alır.

Üç rengin olması başlı başına önemli olmanın yanı sıra, çekirdek parçacıklarının üçer kuarktan meydana gelmesinden de sorumludur. Varsayıma göre fiziksel bir parçacığın var olabilmesi için her üç rengi de bulundurması gerekir. Üç renk için mavi, kırmızı ve yeşil temel renklerini alırsak, parçacığın beyaz olduğu ortaya çıkar, zira bu üç rengin eşit oranlardaki karışımı bize beyazı verir.

Gell-Mann'ın teklifi kuvvet parçacıklarına, İngilizcede yapıştırıcı anlamına gelen *glue* sözcüğünden yola çıkarak gluon adını vermekti. Daha kuarklar üzerine yaptığı çalışmasında yapıştırıcı parçacık anlamında gluonlardan söz etmişti. Şimdi üç farklı kuark, sekiz farklı gluon var.

**EINSTEIN:** "Gluon" kelimesi kulağı tırmalıyor, İngilizceyle Yunancayı karıştırmışsınız gibi. Gerçekten korkunç. Daha iyi bir ad bulunamaz mıydı?

**HALLER:** Fritzsch de sizinle aynı fikirdeydi ve Yunancada renk anlamına gelen *chromos*'tan yola çıkarak "kromon"u teklif etti. Ama Gell-Mann kendi bulduğu terimde ısrarcıydı. Kuramın adı konusundaysa Gell-Mann ile Fritzsch harikulade bir mutabakata vardı: kuantum kromodinamiği ya da kısaca QCD. İsim olarak başta "kuantum hadrodinamiği"ni düşünmüş olsalar da, renk kavramının kuramın adında yer almasını istiyorlardı. Böylelikle kuantum kromodinamiği doğmuş oldu.

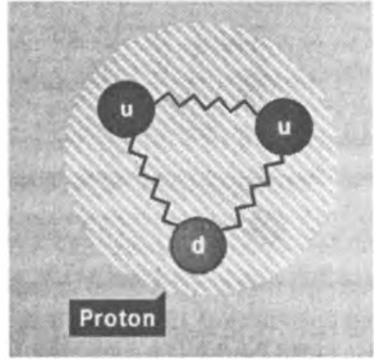
**EINSTEIN:** Bakın bu gerçek bir kuram adına benziyor işte. Kuantum elektrodinamiğinden bile iyi. Peki kuramın kendisi de adı kadar mükemmel mi?

**HALLER:** Evet, kuram sorunsuz işliyor. Şu âna kadar yapılmış tüm deneylerle tutarlılık arz etti, dolayısıyla doğru olduğu düşünülüyor.

**EINSTEIN:** Gerçekten büyü gibi, burada atomlardan müteşekkil halde duruyorum. Atomlarımın çekirdekleri var, çekirdek de proton ve nötronlardan oluşuyor, bunlar da sekiz farklı gluon tarafından bir arada tutulan üç adet renkli kuark içeriyor. Dünyamız gerçekten de fazlasıyla karmaşık bir yer. Neyse ki kuarkların sadece üç rengi var. On farklı renkte olsalar bunları bir arada tutmak için 99 gluon gerekirdi. Şuna bakın, bu dünyada yetmiş beş yıl geçirdim ve meğer tüm varlığım 8 ve elbette 3 sayılarına bağlıymış. İhtiyar çılgın bir evren yaratmış doğrusu. Katolik kilisesi günün birinde gelip, üç renkte kuark olmasının nedeninin teslis olduğunu söylerse şaşırmayın.

**HALLER:** Tanrı saklasın! Ama dediğiniz doğru, çoğu fizikçi bu haliyle bile kuramı fazla karmaşık buldu. Özellikle renk simetrisinin kesinliği hakkında büyük kuşkular hâkimdi. Kuramın işi başta hiç kolay değildi.

**EINSTEIN:** İhtiyarın bu konuda ince eleyip sık dokuduğuna eminim.

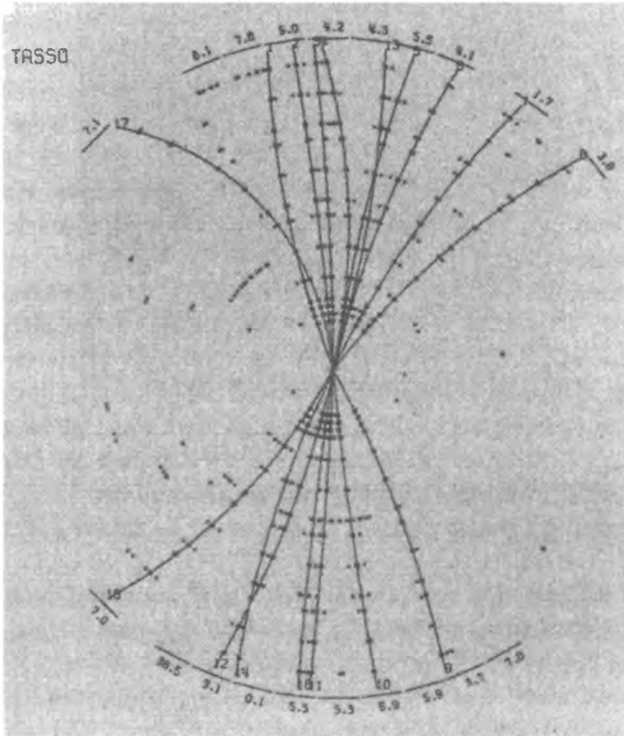



Bir nükleon içindeki
üç kuark ve gluonları.

Şimdiye kadar bozulmamış bir simetri güzel bir şey. Mükemmellikten uzak evrenimizde buna kolay rastlanmıyor. Tanrı'nın hanesine yazılması gereken bir noktaya daha dikkat çekmek istiyorum. Renk simetrisi onun fikriydi, ama bunu hemen fark edilmeyecek şekilde saklamayı da akıl etti. Simetri uzun yıllar ve tartışmalar sonrasında keşfedildi. Yani Tanrı bu simetriyi hem kurdu, hem de hemen göze çarpmasını önlemek için elinden geleni yaptı; ancak Gell-Mann ve Fritzsch gibi dikkatli gözlemciler simetriyi fark ettiler. Gerçekten dâhice. İhtiyar hiçbir şeyi insanın gözüne sokmaz, çoğu zaman da gizemlidir. Burada gerçekten de iyi iş çıkarmış doğrusu. Şahsen QCD kuramını beğendiğimi söyleyebilirim.

**FEYNMAN**: Evet, deneysel fizikçiler de İhtiyar'ın gizlediği bu bilgiye ulaştı. Yetmişli yıllarda elektronlarla pozitronların çarpıştırılarak yok edildiği deneylerde kuarkların dolaylı yoldan da olsa gözlemlenebileceği ortaya çıktı. Bu deneylerde bir kuark ile bir karşı-kuark meydana gelmiş ve diğer bir adı jet olan parçacık demetleri ortaya çıkmıştır.

Deneysel fizikçiler bunun ardından gluonların varlığına işaret eden daha birçok bulguya ulaştı. 1979 yılında Hamburg'daki Alman Elektron-Senkrotronu'nda (DESY), kuark ve karşı-kuark üretimi için elektron ve pozitronların karşılıklı yok edilmesi esnasında ara sıra bir de gluonun yayıldığı fark edildi. Kuramcılar bu etkiye önceden işaret etmişlerdi. Gluon deneyde doğrudan görülebildi. Tıpkı kuark ve karşı-kuarklar gibi kendini bir jetle belli etti. Dolayısıyla burada biri kuarka, biri karşı-kuarka, diğeriyse yayılan gluona ait üç jet gö-




Hamburg'daki DESY'de kaydedilmiş iki kuark jeti.

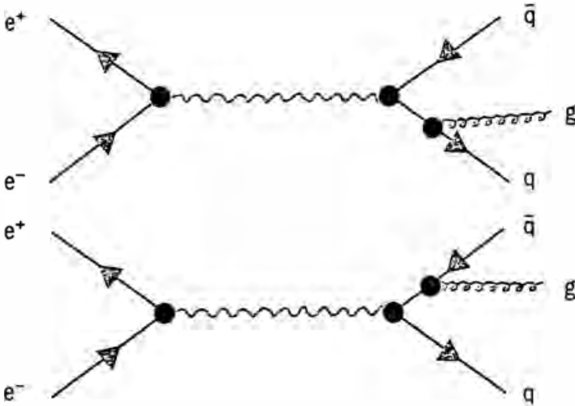
rülüyordu. Aslında mantığı çok basit. Elektron ile pozitron yok edildiğinde ortaya birer kuarkla karşı-kuark çıkar, bunların biri de ilave olarak bir gluon yayar.

Tüm bu deneyler esnasında kuark ile gluonlar arasındaki etkileşimin büyüklüğü hakkında da bazı bilgiler edinildi. Bu parametre genel olarak $\alpha_s$ ile adlandırılır. CERN'de bulunan Büyük Elektron Pozitron (LEP) Çarpıştırıcısı'ndaki çok yüksek enerji düzeylerinde yapılan elektron-pozitron çarpıştırmalarında, bu parametrenin büyüklüğü oldukça kesin biçimde tespit edildi. Halihazırda değer yaklaşık olarak $\alpha_s = 0{,}12$ civarında; buradaki hata payı yüzde 10'un altında. Fotonlar, elektrik yükü üzerinde etkili elektromanyetik bir kuvvet aktarır. Paralel olarak gluonlar, kuarkların renkleri üzerine etki eden

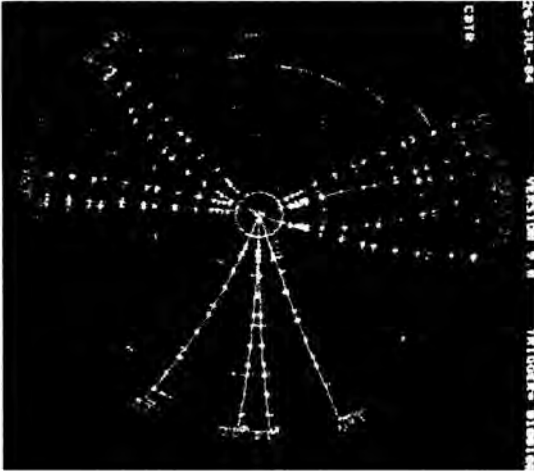
bir kuvvet taşır. Bu etkileşimin QED'dekinden az da olsa farklı olması, renk alanındaki ayar kuramının doğasında yatıyor.

Abelci olmayan ayar kuramının yapısı, Abelci kuramın yapısından, yani QED'den sapma gösterir. Gluonların kuarklara bağlanması, fotonların elektronlara bağlanma şeklinden çok daha farklıdır. Bir elektron ile foton etkileşime girdiğinde etkileşim nedeniyle elektronun hali, özellikle de impulsu değişir ama elektron olarak var olmaya devam eder. Öte yandan bir kuark gluonla etkileşime girdiğinde, renk hali çoğu durumda değişir. Örneğin kırmızı bir kuark yeşile dönebilir. Bu etkileşimler, az önce bahsettiğim renk alanı içerisindeki dönüşümler sebebiyle gerçekleşir. Sekiz farklı dönüşüm olduğundan toplam sekiz gluona ihtiyaç vardır. Bunlar renk taşıma özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Yani bir R → G gluonu ya da G → B gluonu gibi. QED ile QCD arasındaki paralellikleri kullanıp iki kuramın kavramlarını birbirine bağlayan küçük bir liste yapalım:

| QED | QCD |
|---|---|
| Elektron, muon | Kuarklar |
| Elektrik yükü | Renk yükü |
| Foton | Gluon |
| Atom | Nükleon |




Elektron-pozitron çarpışmasıyla bir kuark ile bir karşı-kuarkın üretilmesi. Burada ya kuark ya da karşı-kuark bir gluon yayar.



DESY'deki TASSO (İki Kollu Spektrometre Solenoidi) dedektörü tarafından kaydedilmiş üç jetli bir elektron-pozitron çarpışması olayı.

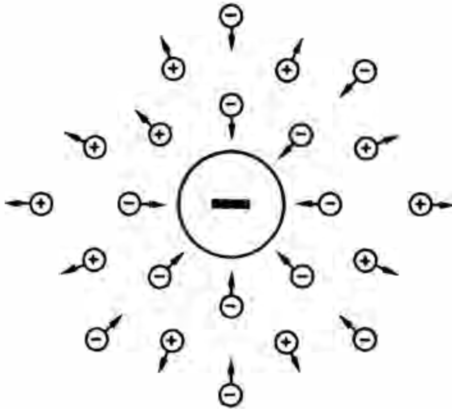
Daha önce de söylendiği üzere QED ile QCD arasındaki en önemli fark, kuvvetin aktarılması için gerekli kuantum sayısıdır: QED'de bir foton, QCD'deyse sekiz gluon. Elektromanyetik etkileşimde ilgili parçacığın elektrik yükü değişmez, öte yandan bir kuarkın rengi bir gluonla etkileşime girdiğinde değişebilir. Bir başka önemli fark daha var. Fotonlar elektriksel olarak yüksüz parçacıklardır, yani kendileriyle elektromanyetik etkileşime geçemezler. Doğa ve teknoloji açısından son derece önemli bir özellik. Bir lazer ışını içindeki sayısız foton bu sayede birbirini etkilemeden ışık hızında seyahat edebiliyor. İşte gluonlar tam da bunu yapamıyor, çünkü sadece kuarklarla değil kendi aralarında da etkileşime girdikleri anlaşıldı. Tıpkı kuarklar gibi gluonlar da renk yüküne sahiptir. Sekiz farklı gluonun renk niteliklerine göre ayrıldıkları düşünüldüğünde bu son derece mantıklı görünüyor. Kırmızı bir kuarkı maviye dönüştürenle yeşile dönüştüren gluon birbirinden farklıdır. Gluon ve kuarklar, üç kuarkı bir araya getirip bir nükleon oluşturacak şekilde davranır.

Kuarklarla gluonlar arasındaki dinamik yakından incelendiğinde, gluonların da renk özelliği taşıması, yani renk simetrisine sahip

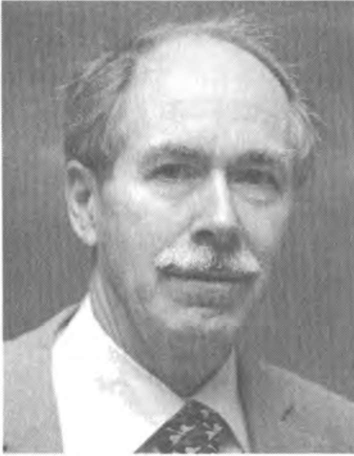
olmaları dramatik sonuçlar doğurur. Özellikle vakum polarizasyonu derinden etkilenir. QCD'nin kuramsal öngörüsü uyarınca vakum sanal kuark, karşı-kuark ve gluonlarla doludur. Bir kuarkın çevresini gözlemlediğimizde, kromodinamik etkileşim tarafından değiştirildiğini görürüz. Tıpkı elektrodinamikte olduğu gibi bir vakum polarizasyonu gerçekleşir. Kuark renk yükü nedeniyle çevresindeki sanal kuarkları uzaklaştırırken karşı-kuarkları kendine çeker. Yine elektrodinamiktekine benzer şekilde kuarkın fiili renk yükü kısmi olarak perdelenir. Ama gluonlar da renk yükü taşıdığından, kuarkın etrafındaki yoğun miktardaki sanal gluon polarize edilir. QED'de böyle bir şey olmaz. Elektron da sanal fotonlarla çevrili olsa da, bunlar diğer fotonlarla etkileşime girmez, zira elektrik yükleri yoktur.

Yetmişli yılların başında QCD vakum polarizasyonunun etkileri yakından incelendiğinde, bunun, yüklerin perdelenmesi dışında QED'dekiyle aynı olduğu düşünülüyordu. Etkinin niteliğinin de farklı olduğu ortaya çıktığındaysa başta herkes şaşırdı. İlk hesaplamalar Rus kuramcı Josif B. Kriploviç ve Hollandalı fizikçi Gerardus 't Hooft tarafından yapıldı.

Princeton'dan David Gross ve Frank Wilczek ile Harvard'dan David Politzer 1973 yılında birbirlerinden bağımsız olarak sanal glu-



Elektronun elektrik yükünün sanal elektron-pozitron çiftleri tarafından perdelenmesi.

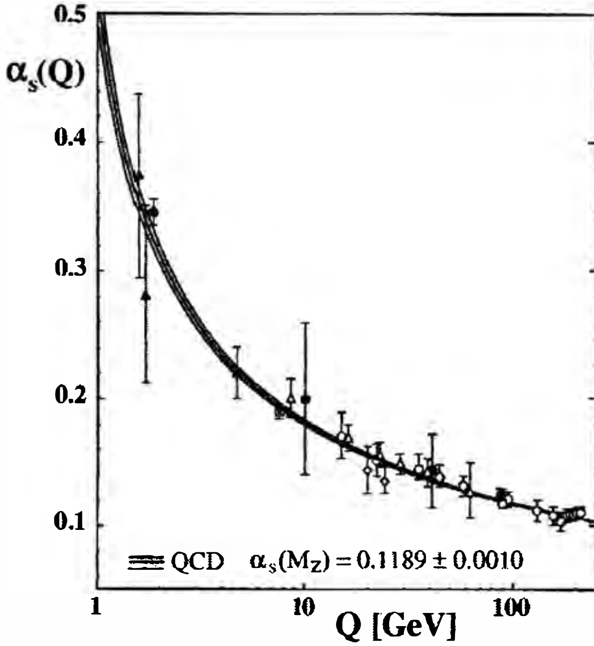


Fizikçi Gerardus 't Hooft.

onların bir kuarkın etrafına yerleştiğini ve bu sayede uzak mesafelerde renk yükünü güçlendirdiğini bulup 't Hooft'un hesapladığı bilgiyi teyit etmiş oldular. Etkileşimin şiddeti bundan doğrudan etkileniyordu. Bilim dünyası için büyük bir sürprizdi bu – etkileşimin şiddeti küçük mesafelerde azalıyordu. Böylelikle asimptotik özgürlük adı verilen bir kuram ortaya atılmış oldu.

**HALLER:** QCD ve bağlanma sabitine dönelim. Daha önce de söylendiği gibi elektromanyetik ince yapı sabiti küçük mesafelerde büyür. QCD' deyse bunun tam tersi söz konusu. Gluonların vakum polarizasyonuna katılmaları nedeniyle QCD sabiti $\alpha_s$ küçük mesafelerde azalır. Aslında bu söylem kendi içinde çelişkili, zira $\alpha_s$ bir sabit değildir, mesafeye ya da enerjiye bağlı olarak değişir. Buna rağmen $\alpha_s$ etkileşimin hangi deneyle ölçüldüğünden bağımsız olarak verili bir mesafede daima aynı değeri aldığından bir etkileşim sabitinden söz edilebilir. Gerçekten de $\alpha_s$ başta elektron-pozitron tepkimeleri ya da elektron-pozitron çarpışması olmak üzere birçok deneyde ölçüldü. Burada örnek olarak 90 GeV altındaki $\alpha_s$ değerini ele alacak olursak $\alpha_s \approx 0{,}12$ çıkar.

Yani bu enerji seviyesinde QCD etkileşimi QED'den yüksek olsa da, $\alpha_s$ 1'e kıyasla oldukça küçüktür, dolayısıyla QED'deki gibi yöntemlerle –yani pertürbasyonla– kuark-gluon etkileşimindeki süreçleri hesaplamak mümkündür. Küçük enerjilerde $\alpha_s$ büyür; gerçekten




Kromodinamik bağlanma sabitinin mesafe fonksiyonu olarak davranışı. Bağlanma sabiti aslında sabit bir değer değildir, mesafenin azalmasıyla beraber küçülür.

de enerji seviyesinin düşmesi durumunda, yani mesafe arttığında etkileşim daha da artar ve sonunda pertürbasyon, yani bozulma kuramı artık uygulanamaz hale gelir. Mesafenin artmasıyla kuark etrafındaki gluon bulutu yoğunlaşır, bu da sanal parçacıkların enerji yoğunluğunun ciddi biçimde artması anlamına gelir. Bu enerji yoğunluğunun, alanı kaplayacak şekilde toplanması kuarkın kütlesini verebilir mesela. Ancak yapılan hesaplamalar, bu şekilde hesaplanan kuark kütlesinin sonsuz büyüklükte çıkacağını, dolayısıyla kütlenin verilmesinin bir anlamı olmadığını öngörür. QCD'ye göre kuarklar serbest fiziksel parçacıklar olarak var olamaz, daima nükleonlar içinde birbirine bağlı durumdadır. Henüz her şey kanıtlanmamış olsa da, günümüzdeki genel kanı bu yönde.

**EINSTEIN:** Bu kurama göre temel parçacıkların aslında serbest olma-

ması gerçekten ilginç bir durum, neredeyse gizemli. Zaten bu yüzden iyi bir kuram ve büyük olasıkla da bu yüzden doğrudur. Fransız ressam Marc Chagall şöyle demiş: Tuhaf görünen her şeyi mantıksız olarak bir kenara atan kişi, doğayı anlamadığını itiraf etmiştir. Nitekim burada da tuhaf şeyler gözlemlenmiş ve bunlar yardımıyla iyi bir kuram oluşturulmuş. Pek hoşuma gitti. Gell-Mann ile Fritzsch'e bravo doğrusu.

Kuramın yalınlığı da takdire şayan. Görelilik kuramını, kuantum mekaniğini, Dirac denklemini, renk kuantum sayısını toplayın, QCD' yi elde ediyorsunuz. Harika!

**HALLER**: Evet, kuramın doğru olduğuna inanıyoruz. Bir kuark ile bunun karşı-kuarkı arasındaki etkileşimi hayal etmek çok öğretici ve ilginç olabilir. Güçlü etkileşimin yaklaşık $10^{-13}$ santimetrelik ölçeğine göre küçük kabul edilecek mesafelerde bu etkileşim, mesafenin karesi oranında azalan elektriksel kuvvet gibi davranır. Kromodinamik kuvveti, tıpkı elektriksel kuvvette olduğu gibi alan çizgileriyle tayin etmek mümkün. Küçük mesafelerde alan çizgileri elektrodinamikteki gibi davranır. Ancak mesafe $10^{-13}$ santimetreden büyük olduğunda durum değişir. Gluonlar kendileriyle de etkileşime girebildiklerinden, kromodinamik alan çizgileri arasında bir çekim oluşur.

Bu etki elektrodinamikteki benzer bir durumla karşılaştırılabilir. İkisinden de aynı yönde elektrik akımı geçen iki paralel tel birbirini çekecektir. Çekim kuvveti, her iki teli de çevreleyen manyetik alan tarafından uygulanır. QCD'de gluonların oluşturduğu alan çizgileri arasındaki kuvvet etkileri, gluonların arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Alan çizgileri elektrodinamikteki teller gibi davranır. Kuarklar birbirinden uzaklaştırıldığındaysa elektrodinamiktekinden çok farklı bir alan çizgisi tablosu oluşur. İki kuarkın birinden çıkan alan çizgileri diğer kuarka yönelirken birbirine neredeyse paraleldir ve bir kondansatörün plakaları arasındaki elektriksel alan çizgilerine benzeyen, alan çizgilerinden müteşekkil bir hortum meydana getirir. Kuarklar arasındaki kuvvet de kondansatör plakaları arasındakine benzer ve mesafeden bağımsız olarak sabit kalır. Bir kuark ile karşı-kuark arasındaki elektriksel kuvvet mesafenin artmasıyla azalırken, kromodinamik kuvvet değişmez. Buradan kuarkları birbirinden ayırmanın mümkün olmadığını anlarız. Birçok soru hâlâ yanıt bekliyor elbette, ancak




Bir kuark ile karşı-kuark arasındaki alan çizgileri uzun mesafelerde paraleldir.

kuarkların bu özelliği zaman ve uzayın sürekli değil kesintili olduğu bir model üzerinde incelendi.

**NEWTON**: Bu durumda zaman ve uzay sadece belli değerler mi alabilir yani? Öne sürdüğünüz bu fikir mantıklı mı? Zaman ve uzay sürekli fenomenlerdir.

**HALLER**: Evet, ama bahsettiğimiz sadece hesaplamayı kolaylaştıracak bir önlem. Burada bir kafes düzeneğinden söz edilir ve işin güzel tarafı, bu sistem sürekli bir uzayda mümkün olmayacak hesapları bilgisayarla yapmaya olanak tanır. Hesaplar zaman ve uzay belli sınırlar içindeyken yapıldığında az önce tarif ettiğim durumun elde edildiği tespit edilmiştir. Alan çizgileri paralel olur; kuarklarsa sonsuza dek hapsolmuştur. Bunun ardından kafes sabiti, yani kafesi oluşturan çizgilerin kesişim noktaları arasındaki mesafe giderek küçültülebilir ve sonunda, uzay yeniden sürekli hale gelecek biçimde kapatılabilir. Kafes düzeneği oluşturmak, zaman ve uzayın sürekliliğini ortadan kaldırmaz, sadece kafes olmadan –en azından henüz– yapılamayacak hesaplamaları mümkün kılar.

Öte yandan kuarklara etki eden kuvvet, mesafe azaldığında iyice zayıflar. Bu da elektron saçılmasında kuarkların yapısız, bağlantısız nesneler biçiminde davranmasını açıklar, zira bu deneylerde QCD kuvvetlerinin etki edemediği elektron, protona duhul eder ve genellikle sadece tek bir kuarkla etkileşime girer; etkileşim süresi oldukça kısıtlı olduğundan gluon etkileşimi ancak belli belirsiz ortaya çıkabilir. Tam da bu noktada gündelik hayatta anlaşılabilecek bir örnek vermek isterim. Biri kırmızı, biri yeşil, diğeriyse mavi üç adet bilyenin içi boş bir cam kürenin içine konduğunu ve burada hızla hareket ederlerken sürekli cama çarptıklarını düşünelim. Camla temaslar arasındaki ortalama süre yaklaşık olarak saniyenin yüzde biri olsun. Şimdi bu kürenin bir fotoğrafını çeker, pozlama süresini de nispeten

uzun, örneğin saniyenin beşte biri kadar tutarsak, bilyeleri değil geride bıraktıkları bulanık imgeyi görürüz. Bu esnada bilyelerin renkleri üst üste bindiğinden üç rengin ortalaması olan beyaz ortaya çıkar. Pozlandırma süresini saniyenin binde birine getirdiğimizdeyse her üç bilye ve renkleri açıkça görülecektir.

Parçacık fiziğinde kuarkların durumu da benzerlik gösterir. Elektronlarla yapılan yüksek enerjili saçılma deneylerinde, çarpışma anının meydana getirdiği pozlama süresi çok kısa olduğundan kuarklar açıkça belli olur. Ne var ki düşük enerjili parçacıklar kullanıldığında, çarpışma süresi de uzun olacağından kuarklar ya hiç görülmez ya da çok az görülür. Dolayısıyla kuarklar kısa pozlama sürelerinde serbest parçacıklar, uzun pozlamadaysa kuvvetlice bağlanmış yapıtaşları olarak karşımıza çıkar. Gluon kuvvetlerinin dar zaman ya da uzam aralıklarında zayıflamasına fizikçiler asimptotik özgürlük adını verir. Bu özgürlük sınıra dayandığında kuarklar serbest kalabilir.

Bu fenomenin yarattığı sonuçlardan biri, etkileşim sabiti $\alpha_s$'nin küçük mesafeler ya da yüksek enerji ölçeğinde giderek daha çok küçülmesi ve bu sayede pertürbasyon kuramı yöntemlerinin QED'deki gibi kullanılmasına olanak tanıması. Kimse böyle bir şey beklemiyordu. QCD'nin atom çekirdeklerinin içindeki güçlü çekirdek kuvvetinin anlaşılmasına sağladığı katkı da yabana atılır cinsten değil. Atom çekirdeği nükleonlardan, bunlarsa kuarklardan meydana gelir. Parçacık fiziğinin asıl çıkış noktası, fizikçilerin çekirdek kuvvetlerini daha iyi anlama arzusuydu. Örneğin altı protonla altı nötronun son derece sağlam bir karbon atomu çekirdeği meydana getirmek üzere bir araya gelmesinden hangi kuvvetler sorumludur?

**NEWTON:** Renk kuvvetleriyle alakalı kuvvetler olabilir mi?

**HALLER:** Evet, gerçekten de öyle. Günümüzde bu kuvvetlerin temel kuvvetler olmadığını, çekirdek parçacıklarının içerisindeki kuarkları bir arada tutan gluon kuvvetlerinin dolaylı bir sonucu olduğunu söyleyebiliriz. Tıpkı moleküllerin oluşumundan sorumlu, elektriksel açıdan nötr atomlar arasındaki kuvvetler gibi – bunlar da atom içindeki elektrik kuvvetinin dolaylı sonuçlarıdır. Günümüzde gerek atom çekirdeğinin gerekse onu meydana getiren parçacıkların üzerindeki sır perdesi kalktığından, çekirdek kuvvetleri ve bunların yapıtaşları hakkında kuantum alan kuramı çerçevesinde kolaylıkla an-

laşılan, ancak bir yandan da şaşırtıcı derecede karmaşık bir tablo çıkıyor ortaya.

**EINSTEIN:** Bence bu güzel bir sonuç. Benden genç meslektaşım Werner Heisenberg'in aksine çekirdek kuvvetlerinin temel kuvvetler olmadığını hep tahmin etmiştim. Görüldüğü üzere haklıymışım.

**HEISENBERG:** Evet, haklısınız. Benim hatam kuarkları ciddiye almamak oldu. Öte yandan yetmişli yılların başında, Gell-Mann ve doktora öğrencisi olarak çalıştığım enstitüye gelen Fritzsch bu kurama son derece ciddiyetle yaklaştı ve ikili başarıya ulaştı.

**HALLER:** Bu konudaki sohbeti tamamlamadan önce, QCD'nin doğada bulunan, kuarklardan müteşekkil nesnelerin yapısı hakkında bize neler söylediğine değinelim. Tıpkı gluonlar gibi kuarklar da serbest parçacıklar değildir, çünkü renk yüklerine sahiptir. Üç renk olduğu için, kuarklar triplet oluşturur. Renklerin her biri eşit ağırlıklı olduğundan ve birbirleri yerine ikame edilebildiklerinden, matematikte bir grupla –bizim durumumuzda SU(3) grubuyla– tarif edilen bir renk simetrisi söz konusudur.

Az önce renk yükü taşıyan kuarkların serbest parçacık olamayacağını söylemiştik. QCD içinde bu sadece kuarklar için değil tüm renkli nesneler, örneğin oktet olarak adlandırılan sekiz farklı gluon için de geçerlidir. Sadece dışarı doğru renk özelliği yansıtmayan nesneler serbest halde bulunur. Matematik dilinde renk teklisi, singulet adı verilen bu parçacıkları oluşturan farklı yapıtaşlarının renkleri birbirini götürür. Bu etki QED'de bilinmekteydi. Atomlar elektrik yüküne sahip çekirdek ve kabuklardaki elektron bileşenlerden meydana gelen nesneler olsa da, toplam yükleri nötrdür ve az önceki tanım uyarınca yük singuleti olarak adlandırılabilirler.

Renkli kuarklarla oluşturulabilecek en yalın renk singuletleri, maalesef şu âna kadar gözlemleyemediğimiz nesnelerdir. Bir kuarkla bir karşı-kuark bir araya geldiğinde bir renk singuleti meydana getirir, zira kuarkın rengi karşı-kuarkınki tarafından nötrleştirilir. Yarısı madde, diğer yarısıyla karşı-maddeden müteşekkil bu nesneler doğada kararsız parçacıklar olarak bulunur. Bunları ancak parçacık süreçlerinde üretmek mümkündür, o zaman da kısa sürede bozunurlar. Mezon adındaki bu parçacıklardan daha önce kısaca söz etmiştik. İlk mezon 1947 yılında kozmik parçacık ışımasının incelenmesi esnasında bulundu. Spini olmayan, elektrik yüklü bu parçacık, elektro-

nun 207 katı, yaklaşık 140 MeV'lik bir kütleye sahipti. Pi-mezonlar bu halleriyle protonlardan çok daha hafifti. Kütle ölçeğinde yaklaşık olarak ortalarda yer aldıklarından, "ortalardaki parçacık" anlamına gelen mezon adını almışlardır.

Çekirdeği oluşturan nükleonlar ve bunların da ötesinde üçer kuarktan meydana gelen tüm nesneler baryon olarak adlandırılır. Kuarklar da renk taşımayan nesneler, singuletler oluşturabilir. Yukarıda tarif edilmiş olan üç u-kuarklı hal, (urugub – ugurub + ...) yapısına sahipti ve Pauli ilkesinin dayattığı karşı-simetri koşulunu yerine getiriyordu. Açılımından da görüldüğü üzere bu halde üç renge de eşit ağırlıkta yer verilmiştir ve iki rengin yer değiştirmesi bakımından da karşı-simetriklik özelliğini yerine getirir. Matematikçi gözüyle bakıldığında, yine bir renk singuletiyle karşı karşıyayız.

Renklerin üçlü hali sayesinde üç kuarktan renk nötürü bir nesne kurulabilir. Elektrik yükünü temsil eden tek renkli bir ayar kuramı olarak yorumlayabileceğimiz elektrodinamikte bu mümkün olmazdı. Atom gibi nötr hallerin elektrodinamikte oluşturulabilmesi için, pozitif elektrik yükünün aynı negatif yükle telafi edilmesi gerekir. Bu açıdan bakıldığında QCD'nin birçok ilginç özelliğe sahip çok daha dinamik bir yapısı olduğunu görürüz. Nitekim QCD genel olarak basit bir kuramdır, ancak çekirdek fiziğinde rastlanan sayısız fenomeni açıklamaya yeter.

**EINSTEIN:** Şu âna kadar andığınız parçacıkların tümü kuarklardan meydana geliyor, gluonlarsa kuarklar arasında kuvvet aktaran parçacıklar olarak ikincil öneme sahip. Ne var ki her biri renk okteti olan iki gluon birleşip singulet oluşturabilir: salt gluon olan ama yine de elektriksel açıdan nötr parçacıklar. Peki var mı böyle bir parçacık?

**HALLER:** Son derece ilginç ama bir o kadar da zor bir soru bu. Fritzsch ile Gell-Mann, "yapıştırıcı mezon" (*glue-meson*) adlı parçacıkları zamanında tanıtmıştı. Kimi fizikçiler, biraz da saygısız bir tavırla bunları "yapıştırıcı topu" (*glue-ball*) olarak adlandırır. Deneysel fizikçiler halen bu parçacıkların izini sürse de henüz bir başarı kaydedilemedi. Burada zorlu bir problemle karşı karşıyayız: Yapıştırıcı mezonlar normal, elektriksel açıdan nötr mezonlarla karışırsa, işin içinden çık çıkabilirsen. Bir dizi nötr mezon keşfedildi, ama hiçbirinin yapıştırıcı mezon olup olmadığı kesin değil. Bunların saf olmayan, karışmış haller olduğu tahmin ediliyor. Deneysel fizikçiler ya-

pıştırıcı mezonun izini sürüyor.

Başlangıç noktasına dönecek olursak: Evet, deneyler olmadan hiçbir şey olmaz. Biz kuramcıların asla unutmaması gereken, fiziğin deneysel bir bilim olduğu. SLAC'ın kullandığı yüksek enerjili elektronlar yardımıyla bin dokuz yüz yetmişli yılların sonuna doğru nükleonların bir tür röntgen filmi çekilebildi. Burada çekirdek parçalarının içinde yer alan ve $^2/_3$ ve $^1/_3$ yüklerine sahip üç adet yapısız nesne görülebiliyordu. Daha ayrıntılı deneysel araştırmalar, kuarkların $^1/_2$ spine sahip nesneler olduğunu ortaya çıkardı. Olası açısal momentum etkileri gözardı edilecek olursa, bir sistemin spini bileşenlerinin spini tarafından belirlendiğinden, protonun spini, içindeki üç kuarkın spinlerinin kombinasyonudur. Bunun için üç kuarkın ikisi birbirinin yükünü sıfırlarken, üçüncünün spini nükleonun spinini meydana getirir. Fakat bir nükleonun spinini, kuarklarının spin kombinasyonundan çıkarmakla ilgili günümüzde de süren bazı sorunlar var. Gluonların bunda büyük bir payı olduğunu tahmin ediyorum. Ama bu konuya daha ayrıntılı girecek olursak korkarım diğer konulara vaktimiz kalmayacak.

Kuarklara dönelim. Kuarklar yüksek enerjilerde ancak noktasal kendilikler olarak var olabilir. Dediğim gibi, sadece yüksek enerjilerde olmak üzere güçlü etkileşimi rahatlıkla gözardı edebiliriz. Düşük enerjilerdeyse durum karmaşıklaşıyor. Burada kuarklar büyük kuvvetlerin etkisindedir. Kuarkların yüksek enerjilerde zayıf bir kuvvetin etkisinde olmalarına asimptotik özgürlük demiştik. Düşük enerjilerdeyse bunun tam aksi olur ve İngilizcesi *infrared slavery* olan "kızılötesi kölelik" adını alır. Tüm bunların sebebi gluonların, Pauli-Yang-Mills kuramına boyun eğmeleri; sadece bu kadarı bile yeterli. Gluonlar tarafından aktarılan kuvvetler, kuarkların birbirinden ayrılmasını engelleyecek kadar güçlüdür. Bu sebeple kuark ve gluonlar ancak dolaylı olarak, örneğin güçlü çekirdek kuvvetinden etkilenmeden atom çekirdeğinin içine nüfuz edebilen elektron, nötrino ya da foton gibi parçacıkların alıcı olarak kullanıldığı deneylerle gözlenebilir.

**EINSTEIN:** Ayar kuramları parçacık süreçlerinin dinamiği, diğer adıyla kuvvetler ve temelde yatan zaman ve uzay yapısı arasında ilginç bir bağlantı oluşturur. Bunlar aslında kendiliğinden ortaya çıkar, çünkü farklı simetri operasyonları farklı yerlerde ve birbirlerinden ba-

ğımsız olarak yürütüldüğünde doğa kanunlarının değişmemesi gerekir. Buna rağmen ayar kuramlarının, evrenimiz dinamiklerini tarif etmede neden bu kadar temel bir rol üstlendikleri hâlâ bir sır. Gerçekten de evrensel kuvvetlerin geometrileriyle dinamikleri arasında bir bağlantı mı kuruyorlar, yoksa bunca öncelikli olmalarına sebep olan, henüz keşfedilmemiş başka bir doğa ilkesi mi var? Geometrinin, yani uzay ve zamanın yapısının burada etkili olduğu görüşündeyim. Büyük olasılıkla da renklerin sayısı, yine üç olan uzamsal boyutlarla alakalı. Ama bu konuda kesin bir bilgi yok elimizde.

Dostum Hermann Weyl'in muzipçe söylediği gibi, anlaşılan İhtiyar' ın hem ayar simetrisine hem de üç sayısına bir düşkünlüğü var. Herkesin kendine özgü tuhaflıkları vardır, O da ayar simetrisi ve 3'e takmış durumda. Elbette daha temel bir gerekçesi olduğuna eminim, ama ne olduğunu henüz bilmiyoruz. Elektrodinamik ve kromodinamiğin ortak yönü, elektron ve kuarkların ikisinde de noktasal nesneler kabul edilmeleri, yani içlerinde yapı barındırmamaları. Dolayısıyla kuarklar ve elektronlar, temel parçacık merdiveninin aynı basamağında kabul edilir.

**HALLER:** Protonların böyle olmadığı biliniyor, ama elektronlar pekâlâ temel parçacık olabilir. Tıpkı elektronlarda olduğu gibi kuarklarda da içsel bir yapının varlığı kanıtlanmaya çalışılsa da, şu âna kadar bir başarı elde edilemedi. Cenevre'deki CERN bünyesinde bulunan Büyük Parçacık Hızlandırıcısı, Hamburg DESY'deki Hadron-Elektron Çemberi (HERA) ve ABD'nin Chicago kenti yakınlarındaki Fermilab hızlandırıcısı yardımıyla bulunan, kuarklar için olası içyapı çapının sınırı, tıpkı elektron için olduğu gibi çekirdek çapının yaklaşık 200' de birine tekabül ediyor. Ne yazık ki bu değer hâlâ yeterli değil.

Saatime bakıyorum da, zaman epey ilerlemiş. Ne dersiniz, bugün öğle yemeğini Caputh'taki Kavaliershaus'ta yiyelim mi?

# 13

# Salınan Nötrinolar

Beş fizikçi öğleden sonra tartışmalarına kaldıkları yerden devam ettiler.

**HALLER:** Şimdi dikkatinizi nötrinoların kuantum mekaniğiyle ilgili tuhaf bir etkiye çekmek istiyorum. Daha önce de dile getirilmişti, nötrinoların varlığı 1928 yılında Wolfgang Pauli tarafından öne sürüldü. Bunlar elektronların nötr kardeşi, yani yük taşımıyorlar ve tam da bu sebeple elektromanyetik etkileşimleri yok ama bunun yerine zayıf etkileşime sahipler. Elektron ve nötrinolar lepton grubunun üyesidir. Pauli nötrino fikrini ilk kez ortaya attığında sadece tek bir nötrino olduğunu düşünüyordu; bugün söz konusu parçacığı elektron-nötrino olarak tanıyoruz. Bunlar aynı zamanda doğada en sık rastlanan nötrino tipi. Güneşin devasa miktarlarda yaydığı bu tipteki nötrinolar sürekli yerkürenin içinden geçer ve son derece nadir durumlarda maddeyle etkileşime girer.

Elektronların yanı sıra yine yük taşıyan ama elektronun 200 katı bir kütleye sahip, muon adlı parçacıklar da vardır. İlk olarak geçtiğimiz yüzyılın otuzlu yıllarında kozmik ışıma içinde keşfedilen muonlar, yapıları itibariyle kararsız olduklarından ömürleri saniyenin milyonda biri kadardır. Muon grubuna giren bir nötrino vardır: muon-nötrino.

1975 yılında SLAC yardımıyla muondan 17 kat ağır olan bir başka yüklü parçacık, tau-lepton ya da diğer adıyla tauon keşfedildi. Bu parçacık 1777 MeV'lik kütlesiyle protonun neredeyse iki katı bir kütleye sahiptir. Aslında sırf bu ağırlığı yüzünden lepton kabul edil-

memesi gerekir, zira lepton adı, "hafif" anlamına gelen Yunanca *leptos*'tan gelir. Yine de grubun içerisindedir. Tauona tekabül eden bir nötrino da vardır: tau-nötrino. Bu cins tauonun ömrü çok kısadır, saniyenin trilyonda biri kadar ve bozunup genellikle bir muona dönüşür. Yani evrende üç elektrik yüklü lepton ve üç nötrino vardır.

**NEWTON:** Bakın, yine üç sayısı. QCD'de üç renk vardı, şimdi üç nötrinodan söz ediyorsunuz. Neden dönüp dolaşıp üç sayısına geliyoruz? Üç renk ile üç nötrino arasında bir bağlantı olabilir mi?

**FEYNMAN:** Maalesef sizi düş kırıklığına uğratacağım Sir Newton. Neden üç renk olduğunu, neden üç farklı nötrino olduğunu bilmiyoruz. Doğanın içinde gizli bu üçlük düzeni mantıklı biçimde açıklamayı başaran bir kuram henüz bulunamadı. Ama haklı olabilirsiniz, belki gerçekten de nötrinolarla renkler arasında bir bağlantı vardır.

**EINSTEIN:** Size söylüyorum işte, İhtiyar üç sayısını seviyor, evreni de ona göre inşa etti.

**HEISENBERG:** Üç sayısının sürekli karşımıza çıkması tuhaf olmasına tuhaf da, tüm bunların kuantum mekaniğiyle ilgisi ne?

**HALLER:** Üç sayısının kuantum mekaniğiyle doğrudan bir ilgisi olduğunu sanmam. Ama şu kadarını söyleyebilirim: Nötrino, makroskobik ölçekte, hatta çok büyük boyutlarda kuantum mekaniksel etkiler gösteren yegâne parçacık; bunun da üç sayısı ve nötrinoların son derece küçük kütleleriyle ilgisi var. Nötrinolar kuantum mekaniksel salınımlar yapar. Nitekim kuantum mekaniği için bu nedenle önemlidirler.

**HEISENBERG:** Nasıl oluyor böyle bir şey? Nötrinolar da elektron gibi normal parçacıklar değil mi? Elektronların salınmadığını biliyoruz.

**HALLER:** Bunun sebebi son derece kendine has bir etki. Bu etki, hayatının büyük kısmını Sovyetler Birliği'nde geçirmiş İtalyan fizikçi Bruno Pontecorvo tarafından 1957 yılında öne sürüldü.

**HEISENBERG:** Pontecorvo'nun argümanı neydi?

**HALLER:** İlk olarak muon ve tauonların meydana getirdiği yüklü leptonların bozunumuna ve elektronların zayıf etkileşimlerine bakalım. Yüklü bir zayıf bozonun etkileşiminin, elektronu nötrinoya dönüştürdüğünü biliyoruz.

$$e^- + W^+ \rightarrow \nu_e$$

Buna paralel olarak muon ve tauonlar için de aşağıdaki tepkimeler yazılabilir:

$$\mu^- + W^+ \rightarrow \nu_\mu \quad \text{ve} \quad \tau^- + W^+ \rightarrow \nu_\tau$$

Nötrinoların kütlesi olduğunu kabul edelim. Bu durumda tuhaf bir şey olur. Örneğin bir elektrondan bir elektron-nötrino elde ettiğimde, bu parçacık kati bir kütleye sahip olmak zorunda değildir, aynı anda kütlenin iki, hatta bazen üç farklı halinin karışımı olabilir. Bir elektron-nötrino pekâlâ iki farklı kütle özdurumunun kuantum süperpozisyonunda (üst üste binmesinde) bulunabilir.

$$\nu_e = (\nu_1 + \nu_2)/\sqrt{2}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki iki nötrino kati kütleli parçacıklardır. Muon-nötrinoysa buna dik süperpozisyonda bulunur. Bu durumda karışım açısı azami, yani 45 derecedir. Bozunum esnasında yüklü lepton, en az iki ayrı kütle özdurumuna sahip bir nötrinoya dönüşür. Böyle karışımlara kuarklarda rastlanır. W bozonları u-kuarklarla etkileşime girdiklerinde genellikle bir d-kuark, kimi durumlardaysa bir s-kuark meydana gelir. Buradaki karışım, d ile s'nin süperpozisyonundan meydana gelir. Karışım açısı nispeten küçük, yaklaşık 13 derecedir.

Şimdi de w bozonunun etkileşimiyle bir elektron-nötrinonun üretildiğini varsayalım. Parçacığı tanımlayan dalga yayılmaya başlar. Nötrino kütlesizse bir ışık parçacığı gibi uçar, yani ışık hızında hareket eder. Oysa iki farklı kütle özdurumundan meydana geliyorsa, her bir kütle özdurumu, ışık hızının biraz altında olan kendi özgül hızlarıyla yayılır; bu arada daha az kütleye sahip olan halin, büyük kütleli olana göre daha hızlı hareket ettiğini de ekleyeyim.

**EINSTEIN**: Yani daha hafif olan hal x noktasına ulaştığında, ağır olanı henüz varmamış oluyor. Zamansal bir kayma söz konusu.

**HALLER**: Aynen. Nötrinolar arasında bir kayma söz konusu. Başlangıçta nötrino, az önce $\nu_e = (\nu_1 + \nu_2)/\sqrt{2}$ formülüyle verdiğimiz süperpozisyon halindeyken, x noktasında farklı bir süperpozisyon vardır, örneğin $\nu_e = a\nu_1 + b\nu_2$ ki buradaki a ve b katsayıları x pozisyonuna bağlıdır.

**HEISENBERG**: O zaman x noktasındaki nötrino aslında bir elektron-nötrino değil, bir elektron ile bir muon-nötrinonun üst üste binmesi.

Dolayısıyla belli bir olasılıkla –ki buna p olasılığı diyelim– bir elektron-nötrino, 1 – p olasılığıyla ise muon-nötrinodur; elbette elimizde iki nötrino olduğunu varsayıyorum. Bu durumda nötrino bir melezdir.

**HALLER:** Kesinlikle haklısınız. Böyle dönüşümlere nötrino salınımları denir. Verdiğimiz örnek tam bir dönüşümdür. Bir elektron-nötrino belli bir mesafe kat ettikten sonra muon-nötrinoya, ardından yeniden elektron-nötrinoya dönüşür ve böyle devam eder. Bunun sebebi 45 derecelik açıdır. Açı örneğin 30 derece olsaydı, dönüşüm tam olmazdı. Dönüşüm esnasında hiçbir şey kaybolmaz; demek ki elektron-nötrinonun oranı yüzde 20 olduğunda, tam olarak yüzde seksen oranında muon-nötrino var demektir.

Pontecorvo bu türden bir karışımı ilk kez tartışmaya sunan kişi oldu. Başta bilim çevrelerinde ciddiye alınmadı. Yetmişli yılların ortasında şahsen nötrino salınımlarıyla ilgilendim. O dönemde Grenoble'da bir çalışma grubunu yönetiyordum. Münih'ten Rudolf Mößbauer buradaki laboratuvarın yöneticisiydi. Salınımlar Mößbauer'in ilgisini uyandırmış ve yapmış olduğum sunumun hemen ardından araştırma grubuyla beraber Grenoble'daki küçük araştırma reaktörünün nötrino ışımasını incelemeye almıştı, ama herhangi bir etki gözlemleyemedi. Ardından İsviçre'ye gitti ve Pasadena'daki Caltech'te çalışan arkadaşı Felix Böhm'le güç birliği yapıp Gösgen'deki büyük reaktörün nötrino ışımasını inceledi. Burada da bir şey bulunamadı. Ama en azından ikili nötrinolar arasındaki kütle farklarını yaklaşık 2 elektronvolta kadar düşürmeyi başardı.

Buna rağmen bir ilerleme sağlanamıyordu, çünkü nötrino salınımlarının gerçekten var olduğunu, ama nötrinolar arasındaki kütle farkının çok küçük, yaklaşık 0,1 eV boyutlarında kaldığını 1999 yılından bu yana biliyoruz. Bilmediğimizse küçük olanın nötrinoların kütleleri mi, yoksa hepsi belli, örneğin 1 eV'lik kütleye sahip nötrinolar arasındaki kütle farkı mı olduğu. Salınımlar ne yazık ki kütlenin kendisi değil, aradaki farklar hakkında bilgi sağlıyor.

**NEWTON:** Anladığım kadarıyla üç farklı kütle durumu söz konusu. Peki o halde nötrinolar nasıl görünür? Elektron-nötrinonun üç kütle durumunun toplamı olduğunu ve katsayılarla çarpıldığını öğrendik, diğer iki nötrino için de aynı şey geçerli. Yakın zamanda yapılan deneyler nasıl sonuç verdi? Karışımların muhteviyatı nedir?

**HALLER**: Söyleyeyim. Ölçümler çok kesin olmamakla beraber üç nötrinonun kütle özdurumlarının şu şekilde olduğu ortaya çıktı:

$$\nu_e = 0,83 \ldots \nu_1 + 0,56 \ldots \nu_2$$
$$\nu_\mu = -0,40 \ldots \nu_1 + 0,59 \ldots \nu_2 + 0,71 \ldots \nu_3$$
$$\nu_\tau = 0,40 \ldots \nu_1 - 0,59 \ldots \nu 2 + 0,71 \ldots \nu_3$$

Burada $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ nötrinoları, kütle özdurumları. Ama az önce de dediğim gibi salınımlar sadece nötrinolar arasındaki kütle farklarını verir, mutlak kütle değerlerini değil. Bugün elimizdeki bilgi kütle farklarıyla kısıtlı. Bu fark da genellikle kütlelerin karesiyle veriliyor. İlk ve ikinci nötrino kütlelerinin karelerinin farkı yalnızca 8 x $10^{-5}$ $eV^2$, ikinciyle üçüncü nötrino kütlesi arasındaysa 2,5 x $10^{-3} eV^2$'lik bir fark var.

**FEYNMAN**: Kütleler arasındaki fark gerçekten de çok küçük; ikinciyle üçüncü nötrino kütleleri arasında sadece $^1/_{20}$ elektronvolt var. Mößbauer'in bir şey bulamamış olmasına şaşmamak gerek. Belki de üç nötrino da aynı kütleye sahiptir, örneğin 1 elektronvolt, olamaz mı?

**HALLER**: Mümkündür. Diğer bir olasılıksa nötrino kütlelerinin hepsinin çok küçük olması. Örneğin ilk nötrino kütlesi sıfır olsa, ikincisinin 0,01 eV, üçüncününse 0,06 eV'lik bir kütleye sahip olmasını bekleriz. Mutlak nötrino kütlelerini deneyle tespit etmek çok zor. Bence bunu bir kenara bırakıp salınımlara dönelim. Az önce üç nötrinonun kütle özdurumlarından müteşekkil olduklarından bahsetmiştim. Elektron-nötrinoları temelde iki, diğerleriyse üç kütle özdurumundan meydana gelir.

**NEWTON**: Öyleyse salınımların dalga boylarının durumu nedir?

**HALLER**: İlk olarak salınım dalga boyu belirlendi ve buradan yola çıkarak kütle farklarının büyüklüğü bulundu. Örnek olarak $\nu_\mu - \nu_\tau$ salınımlarına bakalım. Japonya'daki Kamiokande dedektörüyle üst atmosfer katmanından gelen nötrinolar incelendi. Kozmik ışımalar atmosfere çarptığında öncelikle pi-mezonları üretilir, bunlar da bozunum esnasında muon-nötrino meydana getirir. Kamiokande dedektöründe nötrinolara bakıldı ve bir salınım gözlemlendi. Muonnötrinolar, tau-nötrinolarla salınım yaparken elektron-nötrinolarla hiç denecek kadar az salınım yapar.

Dünyanın öte yanından gelen, yani yerkürenin içinden geçen nötrinolar da Kamiokande'de tespit edildi. Bu sayede büyük salınım dalga boylarını incelemek mümkün oldu. Deneylerde 2000 kilometre-

lik salınımlar tespit edildi. Kamiokande tarafından yakalanan ve menşei güneş olan elektron-nötrinoların salınım boyu çok daha uzun. Salınım boyları tam olarak bilinmese de, yaklaşık olarak 100.000 kilometre civarında olduğu tahmin ediliyor.

**HEISENBERG:** Oldukça etkileyici. Kuantum mekaniği binlerce kilometre büyüklüğündeki ölçeklerde sınava tabi tutuluyor. Böyle bir şeyin mümkün olduğuna inanmazdım.

**HALLER:** Evet, nötrinolar bize bu imkânı tanıyor. Sebebi de nötrino kütleleri arasındaki farkın bunca küçük olması. Kamiokande'den sonra yeni deneyler de planlanıyor. Chicago'daki Fermilab'den kuzeye doğru bir nötrino ışınının gönderilmesi tasarlanıyor. Yaklaşık 500 kilometre ileride bu ışın bir dedektöre isabet edecek ve bu sayede karışım açısını belirlemek mümkün olacak. CERN'den çıkan nötrino ışınıysa Roma'nın doğusundaki Gran Sasso tünelindeki laboratuvara yönlendirilecek. Böylelikle ışının muhteviyatı incelenip karışım açısı kati biçimde belirlenebilecek. Günümüzde tau-nötrinoyla muon-nötrino arasındaki karışım açısının yaklaşık olarak 45, elektron-nötrinoyla diğer ikisi arasındaki açınınsa yaklaşık 35 derece olduğu tahmin ediliyor.

**EINSTEIN:** Karışım açılarının bu kadar büyük olmaları sizce de tuhaf değil mi? Peki İhtiyar neden nötrinolara bu kadar minik bir kütle vermiş olabilir? Tıpkı fotonlar gibi kütlesiz olmaları işleri kolaylaştırmaz mıydı?

**HALLER:** Evet ama o zaman da kuantum mekaniğini binlerce kilometrelik ölçeklerde inceleyemezdik. Elektron ve nötrino gibi temel fermiyonların nasıl üretildiklerini halen biliyor değiliz. Belki de İhtiyar'ın başka seçeneği yoktu. Elektronlara kütle vermenin bir yolunu bulması gerekiyordu ve bunu yaparken nötrinolar da otomatik olarak, minnacık da olsa kütle kazandılar.

**EINSTEIN:** İhtiyar'ın başka seçeneği mi yoktu? Yani sizce nötrinoların kütle sahibi olmasının yegâne sebebi, elektronların kütlesi olması mıydı? Ben bu tuhaf dünyayı gerçekten anlamıyorum sanırım.

**HALLER:** Herr Einstein, beğenelim ya da beğenmeyelim, içinde yaşadığımız dünya böyle bir yer. Bu arada lafa daldık, saat yine epey ilerlemiş. Akşam yemeği için yine Caputh'a inmeye ne dersiniz? Sizce de Fährhaus restoranı uygun mudur?

# 14

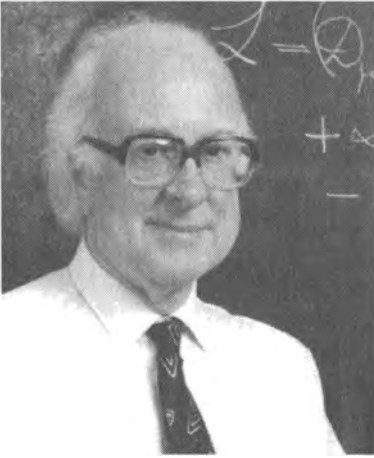
# Kütlenin Sırrı

Sabah olduğunda fizikçiler kahvaltı için yine terasta buluştular. Hava oldukça güzeldi, gökyüzünde tek bir bulut bile görünmüyordu. Einstein yelkenliyle gölde küçük bir gezintiye çıkmayı ve tartışmayı açık havada sürdürmeyi önerdi. Herkesin kabul etmesiyle kayıkhaneden çıkardığı yelkeni direğe çekti. Az sonra göle açılmışlardı bile. Hafif bir meltemle ağır ağır suyun üzerinde seyretmeye başladılar. Einstein dümendeydi.

**NEWTON:** Mr. Feynman, kuantum kuramı hakkında onca laf ettik, ama hâlâ anlamadığım bir şey var. Atomların nükleon ve elektronlardan müteşekkil olduklarını biliyoruz. Bu parçacıklar da belli kütlelere sahipler. Peki bu kütle nereden geliyor?

Parçacık fiziği çerçevesinde bunca bahsettiğimiz Standart Model bu kütlelerin varlığını açıklayabiliyor mu? Einstein'ın kuramına göre kütle bir tür dondurulmuş enerji, bu sebeple de parçacıkların kütlelerini, örneğin elektronvolt gibi enerji birimleriyle tarif etmek mümkün. Bir elektronun kütlesi yaklaşık olarak $9 \times 10^{-31}$ kg, Einstein'ın formülüne göre çevirirsek yaklaşık 0,577 eV yapıyor. İyi ama bu kütlenin kaynağı ne?

**FEYNMAN:** Mr. Newton, gerçekten de son derece ilginç bir soru sordunuz. Açık yüreklilikle itiraf edecek olursam, bunu henüz kimse bilmiyor. Atom fiziği daha emekleme çağındayken sadece proton ve elektronun kütlesi biliniyordu. Günümüzde maalesef durum biraz daha karmaşık. Yük taşıyan üç leptonun, üç farklı nötrinonun, altı kuarkın ve son olarak da zayıf bozonların kütleleri var. Tüm bu kütlelere nasıl ulaşıldığını inanın bilmiyorum.



Peter Higgs

**HALLER:** Zayıf etkileşim bozonlarına ait kütlenin nasıl açıklanacağı üzerine atmışlı yıllarda çok kafa yoruldu. Ayar kuramlarında, tıpkı QED ve QCD'de olduğu gibi öncelikle kütlesiz ayar bozonları vardır. Foton ve gluonların kütlesi yoktur.

Başta İngiliz fizikçi Peter Higgs olmak üzere kimi kuramcılar, zayıf bozonların kütlelerini, günümüzde Higgs alanı olarak bilinen bir skaler alanla açıklamayı teklif ettiler. Açıklamanın ilginç yanıysa kütlelerin, kendiliğinden simetri kırılması sonucu meydana gelmesi. Buna Higgs mekanizması adı verilir.

**NEWTON:** Kendiliğinden simetri kırılması da nedir?

**HEISENBERG:** Bu sorunuza ben yanıt vereyim. İyisi mi ufak bir örnek üzerinden gidelim. Üzerinde bulunduğumuz gölün suyunu ele alalım. Tamamiyle homojen. Şimdi sıcaklığı düşürelim. Su donar ve buz oluşumu başlar. Özellikle kışları, atmosferdeki su donup yere düştüğünde bunu buz kristalleri şeklinde görürüz. Kristallerin tümü, suyun moleküler yapısı nedeniyle altılı bir biçime sahiptir. Yani buz kristalleri artık homojen değildir. Suyun homojenliğinin simetrisi bozulmuştur ya da diğer bir deyişle kendiliğinden kırılmıştır.

**EINSTEIN:** Peki Higgs mekanizması bunu nasıl başarıyor? Bir alan simetri kırılmasıyla kütle oluşturuyor dediniz. Kütle, kırılan bir simetrinin ürünü mü?

**HALLER:** Evet. Şöyle açıklayayım: Zayıf bozonların alanlarıyla etki-

leşim halinde olan bir skaler alan vardır – tıpkı fermiyonlarda olduğu gibi. Kendiliğinden simetri kırılması etkisiyle skaler alan vakumda sıfıra eşit olmayan bir değer kazanır. Buna "vakum beklenti değeri" de denir. Bu değerin büyüklüğü verilebilir, zira kurama göre, zayıf etkileşimin süreçlerini, örneğin nötron bozunumunu tarif etmeye yarayan Fermi sabitini belirleyen bu vakum beklenti değeridir. Bunun ardından alanın vakumdaki değeri hesaplanır ve yaklaşık olarak 294 GeV'lik oldukça yüksek bir enerji miktarına ulaşılır.

Buradan hareketle w ve z parçacıklarının kütlelerini hesaplamak artık mümkündür, çünkü bunlar karışım açısı $\theta_w$ olarak adlandırılan bir parametre tarafından belirlenir. Yapılan deneylerde bu açının yaklaşık 29 derece olduğu gözlemlendi. Bu durumda w ve z'nin kütleleri yaklaşık 80 ve 91 GeV'ye tekabül eder. Kuram ile deney arasındaki tutarlılık gerçekten etkileyici.

Hemen şunu eklemekte yarar var: Ayar bozonu kütlelerinin devreye girmesiyle kuantum alan kuramında sonsuzluklar sorunu meydana geldi. Ama Gerardus 't Hooft ve Martinus Veltman, bu sonsuzlukların, tıpkı QED'deki gibi absorbe edilebileceğini Hollanda'nın Utrecht kentinde gösterdi. Hatta kuramın simetri kırılmasından sonra yeniden normalleştirilebileceği bile ileri sürülmekte. Bu görüşlerinden dolayı 't Hooft ve Veltman 1999 yılında Nobel Ödülü'nü aldılar. Higgs alanıyla kütle kazandırmanın avantajı, bu sayede w ve z parçacıklarının kütlelerinin de ayar kuramındaki elektrozayıf kuvvetle sorun yaşamadan tarif edilebilmesi. Higgs alanı bunun ötesinde elektrozayıf ayar etkileşiminin simetrisini kırmakta kullanılır. Kesin bir simetri durumunda w ve z parçacıkları kütlesiz olacağından bu önemli bir özelliktir.

Dezavantajlı yanıysa, bu kuram çerçevesinde elektron ya da diğer parçacık kütlelerinin hesaplanmasının mümkün görünmemesi. Yine de doğa, kuark ve leptonlara bu yolla kütle kazandırıyor olabilir. Kesin olan, kütle üretim modellerinin en basitinin deneyle test edilebilir olması.

Bütün fiziksel alanların bir parçacığa bağlı olması gibi, Higgs alanı da, yeterli büyüklükte bir enerjiyle gerçekleştirilecek bir parçacık çarpışmasıyla üretilebilecek Higgs parçacığına bağlıdır. Fakat adı geçen enerji öylesine yüksek ki, Higgs parçacığının gerçekten var olup olmadığı ancak Cenevre yakınlarındaki CERN'de inşa halin-



Martinus Veltman

de olan LHC'de yapılacak deneylerle anlaşılabilecek.

**HEISENBERG:** Peki bu Higgs parçacığı nasıl keşfedilecek?

**HALLER:** Higgs'in iki protonun çarpışmasıyla ortaya çıkacağı düşünülüyor; ardından iki z parçacığı oluşacak ve bunlar da bozunarak ikişer muon haline gelecek. Dolayısıyla Higgs'in üretilmesi sonucu dört adet yüksek enerjili muon var olacak. Bunlar nispeten kolay gözlemlenebilir parçacıklar.

Higgs parçacığının başka bozunum yollarını aramak da mümkün. Parçacığın baskın bozunum yolunun ne olduğu bilinmiyor, zira kütlesi henüz belli değil. Kütlenin yaklaşık olarak 115 ila 500 GeV dolaylarında olduğu tahmin ediliyor. Burada 115 GeV'yi vermemin nedeni, CERN'deki LEP hızlandırıcısıyla bulunan alt sınırın bu olması. Kütlenin 180 GeV çıkması da ihtimal dışı değil.

Higgs mekanizması maalesef fermiyon kütlelerinin büyüklüğü hakkında bilgi vermekten uzak. Lepton ve kuarkların kütleleri bu parçacıkların bir altyapısının sonucu da olabilir, tıpkı proton kütlesinin protonun bir altyapısı olması gibi.

Lepton ve kuarklarla yapılan deneylerde, 0,1 MeV'lik nötrino kütlesinden, yaklaşık 175.000 MeV, diğer bir deyişle 175.000.000.000 eV'lik t-kuark kütlesine uzanan geniş bir kütle tayfı gözlemlendi. Yani $10^{12}$ büyüklüğünde devasa faktörler söz konusu.

Yüzyılımızın başında hidrojen atomunun, basit bir yapı teşkil etmekle beraber kuramsal olarak anlaşılamayan bir enerji tayfına sahip olduğu anlaşılmıştı. Ancak kuantum mekaniğinin ortaya atılma-

sıyla bu tayf üzerindeki sır perdesi aralandı. Lepton ve kuarkların kütle tayfının anlaşılması için kuramsal bir atılıma ihtiyaç var. Sır perdesinin tamamen kalkmasının daha ne kadar süreceği belli değil.

Şu âna dek sadece lepton ve kuarkların meydana getirdiği fermiyon grubunun ve zayıf etkileşimin taşıyıcısı bozonların kütleleri hakkında konuştuk. İstikrarlı ve sağlam maddenin varlığı içinse elektronların kütlesi önemlidir. Ancak evrendeki gözlemlenebilir maddenin büyük kısmını atom çekirdeği kütleleri, bunlarıysa proton ve nötron kütleleri meydana getirir.

Artık QCD kuramını kullanarak kütleleri hesaplayabiliyoruz. Kuark ve gluonların QCD kuramı doğrultusunda oluşturduğu sürekli bağ, nükleon kütlelerini otomatik olarak yaratır. Söz konusu kütleyi anlamak oldukça kolay. Nükleonlar kuark ve gluonlardan müteşekkildir, bunlar da alanlar tarafından belirlenir. Nükleon kütlesi dediğimiz, kuark ve gluonların alan enerjisinin toplamından başka bir şey değildir. QCD kuramı içinde bu kütleler hesaplanabilir. Fizik tarihinde ilk kez bir kütleyi hesaplamak mümkün oldu. İşte ben buna atılım derim.

Öte yandan iş elektronun kütlesini hesaplamaya geldiğinde karanlık bir alana adım atıyoruz. Elektronun kütlesi de bir tür alan enerjisi, örneğin elektronu meydana getiren bileşenlerin –eğer varsa böyle bir şey– alan enerjilerinin toplamı olabilir mi? Bu durumda elektron noktasal bir parçacık olmaktan çıkar ve proton gibi içsel bir yapıya kavuşur. Elektronun yarıçapını bilmediğimizden bunu hesaplamamız olası değil şu anda. Deneyler bize gösterdi ki, elektronun yarıçapı $10^{-17}$ santimetreden küçük olmalı. Bu da protonun yarıçapından 10.000 kez daha küçük.

Kütleler problemini çözmemize yarayacak kuramsal çerçevenin ne olacağını bugünden kestirmek zor. Öte yandan zaman ve uzay hakkındaki anlayışımızın bununla değişeceğini tahmin etmek hiç de güç değil.

Kimi zaman evrende, galaksilerden çok uzaklarda yüksek enerjili fotonlar çarpışabiliyor. Bu esnada ortaya çıkan enerji yeterince büyükse, çarpışma sonucunda bir muon ve bunun karşı-parçacığı meydana gelebilir. Bir muonun gerçekten var olduğu bilgisinin, çarpışma anında bulunması gerekir. Peki ama bu parçacık nereden gelir? Çarpışan fotonlarla birlikte taşınmış olamaz, zira fotonlar taşıdıkları

enerjiyle tarif edilen son derece yalın parçacıklardır. Dolayısıyla muon bilgisinin taşıyıcısı ancak boş hacim, yani vakum olabilir.

Lepton ve kuarkların kütleleri de dahil olmak üzere parçacık etkileşimleri hakkındaki tüm bilgilerin boş hacimde önceden bulunuyor olması gerekir. Boşluk doğa yasalarının tüm "yazılımını" içerir. Bu varsayımın kulağa tutarlı gelmesi, ancak kuramın yalın ve derli toplu olmasıyla mümkündür. Zaman ve uzayın yapısı, kısa mesafelerde parçacık etkileşimlerinin de yapısını belirliyor olabilir. Bunun doğal bir sonucu da, parçacık dinamiğine geometrik nitelik kazandırılmasıdır. Dolayısıyla boşluk gerçek anlamda boş değil, büyük miktarda bilgiyle doludur.

Yunan filozofu Demokritos, zamanında "Sadece atomlar ve boş hacim vardır," demişti. Bugün yaşıyor olsa, sadece uzay-zaman ve leptonlarla kuarklar vardır derdi. Ki son anılan ikisi de olasılıkla uzay-zamanın birer tezahürüdür. Lepton ve kuarkların kütleleri problemi, yeni binyılın başında da bir bilinmez olmayı sürdürüyor.

**FEYNMAN**: Haller, mirim, sanırım siz parçacık kütleleri alanında çalışıyor olmalısınız, aksi halde onlar hakkında böylesi şiirsel ifadelerle konuşmazdınız. Pekâlâ, sanırım yelkenliyle yeterince gezdik ve bol bol açıklanamayan kütlelerden bahsettik, Herr Einstein. Bence artık karaya ayak basıp öğle yemeğiyle ilgilenme vakti geldi.

Schwielowsee'nin güney kıyısındaki Ferch köyüne gelmişlerdi. Einstein tekneyi iskeleye yanaştırdı ve hep birlikte alışverişe gittiler. Yaklaşık 20 dakika sonra döndüklerinde, aldıkları süt, tereyağı, şarap, ekmek, jambon ve Macar salamıyla göl kenarındaki çayırlıkta öğle yemeklerini hazırladılar.

# 15

# Doğa Sabitleri Doğabilimlerinin Sırrı

Doğaçlama yemeklerinin ardından beş fizikçi yakındaki koruda yürüyüşe çıktı. Sonra yine demir alıp yelkenleri açtılar.

**HALLER:** Beyler, şimdi son zamanlarda üzerine bolca tartışılmış bir konuya değinmek istiyorum. Doğa sabitlerinin fizikteki yeri.

**NEWTON:** Doğa sabiti nedir?

**FEYNMAN:** İzlenen ilk doğa sabiti aslında sizin eseriniz olan kütleçekim sabiti, Sir Newton. Tanımı itibariyle doğa sabiti, doğa yasalarında karşımıza çıkan ama hesaplayamadığımız, sadece deneyle belirleyebildiğimiz katsayılardır. Dediğim gibi kütleçekim sabiti de bunlardan biridir.

**NEWTON:** Evet, biliyorum. Kütleçekim sabiti başımı epey ağrıttı doğrusu. Hesaplanamayan sabitlerden pek hazzetmiyorum. Peki, kütleçekimininki dışında da sabitler var mı?

**FEYNMAN:** Evet. Üstelik sayıları da maalesef oldukça fazla. Parçacık fiziği alanında çalışan biliminsanları en az 28 farklı sabitten söz ediyor. 20. yüzyılda bunlar yardımıyla tüm mikrofiziği açıklayacak, Standart Model tabir edilen bir kuram geliştirdiler. Standart Model maddenin temel bileşenleri olan elektron ve kuarkların etkileşimini tanımlar. Fizik alanında yetkin kişilerin matematik yardımıyla birkaç satırda özetleyebilecekleri bu kuram, bu haliyle bir tür Her Şeyin Kuramı'dır; tıpkı Sayın Heisenberg ve Einstein'ın da zamanında yoğun biçimde aradıkları gibi.

Kuramın doğruluğu kanıtlanırsa, elektron ve kuarkların gerçekten de evrenimizin temel parçacıkları oldukları kesinlik kazanacaktır. Malumunuz olduğu üzere henüz bu konuda kesin bir şey söyleyemiyoruz. Standart Model de kafada kimi soru işaretlerine sebep oluyor, nitekim bu sebepten fizikçiler bunun, kapsamlı bir kuramın iyi işleyen ilk yaklaştırımı olduğu görüşünde. Bu durumda yapılan deneylerde Standart Model ile açıklanamayan yeni fenomenlerin ilk emareleriyle karşılaşacağız demektir.

Standart Model içindeki etkileşimler, simetriler tarafından dayatılan son derece özgül yasalara boyun eğer. Bunlar QED ve QCD bağlamında bahsettiğimiz ayar simetrileridir. Etkileşimler ve temel parçacıklardan müteşekkil bu simetriler birbirleriyle iç içe geçmiştir. İşte tüm bu bilgiler ışığında, doğa yasalarının tuhaf bazı sayılara bağlı olduğu ortaya çıktı. Sizin kütleçekim sabiti de bunlardan biri işte.

İnce yapı sabiti $\alpha$, fizik alanındaki ikinci temel sabitti. Ama kütleçekim sabitinin aksine $\alpha$ sabiti salt bir sayıdır, yani kilo, metre ya da saniye gibi herhangi bir birime sahip değildir. Böyle bir sayının çoktan hesaplanmış olacağı düşünülür, ama ne yazık ki bunu henüz kimse başaramadı. $\alpha$ sayısı deneylerle belirleniyor. Günümüzde tam değeri oldukça yüksek bir kesinlikle $\alpha = {}^{1}/_{137{,}035.999.76}$ olarak belirlenmiş durumda. Bölme işleminin sonucu 0,01'den küçük bir sayıdır. $\alpha$'nın ters değeri neredeyse bir tamsayıdır: bir asal sayı olan 137.

Bu sayı doğabilimlerindeki en ünlü sayıdır ve tedavüle girdiği günden bu yana birçok spekülasyona sebep olmuştur. Sadece atom fiziği için önemli olmakla kalmaz, elektromanyetik etkileşimin kuvvetini açıklamasıyla bilim ve tekniğin tüm alanları için temel bir önem taşır. Elektromanyetik etkileşim, hepinizin de bildiği üzere QED tarafından tarif edildiğinden ince yapı sabiti $\alpha$'nın QED'nin serbest bir parametresi olduğu söylenebilir.

$\alpha$'nın değeri gözlemlediğimizden farklı olsaydı gündelik yaşamımızda birçok şey şimdikinden farklı olurdu, çünkü atom ve moleküllerin yapıları bu sabite yakından bağlıdır. Buna bir de evrende yaşamın ancak doğa sabitleri belli değerlerdeyken mümkün olduğunu ekleyebiliriz. Peki o zaman neden bu sabitler evrenimizde tam da bu değerleri almıştır? Bu sorununun cevabını kimse bilmiyor. $\alpha$ şimdikinden biraz daha küçük değere sahip olsa, birçok kompleks molekül kararlı bir sistem oluşturamazdı. Elbette bunun temel biyo-

loji üzerindeki etkilerini tahmin etmek zor değil. α değerinin kuramsal yolla hesaplanabilmesi, temel etkileşimlerin anlaşılması açısından kuşkusuz büyük bir atılım yaratacaktır.

Güçlü etkileşim de, bir kuantum alan kuramı olan kuantum kromodinamiği tarafından tarif edilir. U ve d yani yukarı ve aşağı olarak nitelenen iki tip kuark evrenimizdeki normal çekirdek maddesinin yapıtaşlarıdır. QCD kapsamında da ince yapı sabitine benzer, α(s) adını taşıyan ve söz konusu s enerjisine bağlı bir sabit vardır. Bu sabit de deneyle tespit edilir. 100 GeV civarında bir s değerinde α(s)'nin yaklaşık 0,12 olduğu bulunmuştur.

Yani evrenimizdeki kararlı madde, kütleçekim sabiti G, ince yapı sabiti α, güçlü etkileşim sabiti α(s), elektronun ve iki kuark tipinin (u ve d) kütleleriyle tarif edilir. İşte bu altı parametre tüm atom fiziğinin yanı sıra çekirdek fiziğinin de temelini oluşturur.

Elbette zayıf çekirdek etkileşimlerini de unutmamak gerek. Bunlar maddenin yapısı açısından önemli olmasalar da, nötron gibi kararlı parçacıkların bozunumunu açıklar. Tıpkı ince yapı sabitinde olduğu gibi burada da etkileşimin kuvvetini belirleyen bir başka serbest parametre ve etkileşimi aktaran w ve z parçacıklarının kütleleri vardır. İlave olarak elektronun kuzenleri olan muon ve tauon eklenir. Bu parçacıklar son derece kararsız olup üretimlerinin akabinde hızla bozunsalar da belli kütleleri vardır. Örneğin muon elektrondan 200, tauon ise 3 bin 500 kat daha ağırdır. Her biri kendi kütlesine sahip dört kararsız ağır kuarkı da saymak gerekir. Bu kuarklar da bozunurken, karışım açısı olarak yorumlanan yeni parametreler meydana gelir. Tümünü topladığımızda Standart Model kapsamında 19 doğa sabitine ulaşırız.

Günümüzde nötrinoların küçük de olsa birer kütleye sahip olduğu bilinmekte, dolayısıyla bunların da karışım açıları var, yani sabitler listemiz uzuyor. Hepsini eklediğimizde toplam 28 temel sabite ulaşıyoruz.

Peki bu doğa sabitleri nereden geliyor? Deneyler bu sabitleri giderek daha kesin bir hassasiyetle belirleyebilmemizi sağlasa da, hassasiyetle beraber tuhaflıkları da artıyor. Doğa sabitleri bizim bu alandaki bilgisizliğimizi yüzümüze vuruyor gibi, zira bu değerlerin nasıl sabitlendiklerini bilmiyoruz. Kuramsal olarak açıklanamayıp sadece deneylerde gözlemlenebilen sayılar bir fizikçi için tatsız bir

olaydır. Henüz bilmediğimiz doğa yasaları mı belirliyor bu sabitleri, yoksa bunlar Büyük Patlama'nın tesadüfi ürünleri mi? Hâlâ cevap bulunamamış bir soru daha.

Şimdiye dek kimsenin nasıl oluştuklarını açıklayamadığı doğa sabitleri, doğabilimlerinin çözülememiş gizemlerinden biri. Belki yakın gelecekte bazı sabitleri hesaplamak mümkün olacak, ama ince yapı sabiti başta olmak üzere bazıları gerçekten de Büyük Patlama'nın tesadüfi ürünleri olabilir. Nitekim hesaplanamaz olmalarının sebebi bu olabilir. Yeni bir Büyük Patlama olsa, söz konusu sabitler başka değerler alacaktır.

**EINSTEIN:** 28 ayrı doğa sabiti mi? Gerçekten inanılır gibi değil! Benim kütleçekim kuramımda sadece tek bir tane var, o da Newton'ın kütleçekim sabiti.

**HALLER:** Sabitlerin sayısı azaltılmaya çalışılsa da, ne yazık ki bugüne kadar başarılı olunamadı. İsterseniz şimdi bu sabitlerden bazılarına, özellikle de ince yapı sabitine yakından bakalım. Bunun için Batı Afrika'daki Gabun'a ve iki milyar yıl geriye gidelim. Burada çok eski dönemlerde büyük bir ırmak olan Oklo yakınlarında büyük bir uranyum birikimi vardı. Oklo'nun suları uranyuma duhul etti. Uranyum-235 bozunumu sonucu serbest kalan nötronlar ırmağın suyu tarafından yavaşlatıldı. Akabinde bir zincirleme tepkime başladı. Uranyumun ısınıp suyun buharlaşmaya başlamasıyla tepkime sona erdi. Uranyum tekrar soğuyunca yine içine su girdi ve zincirleme tepkime baştan başladı. Bu olay birkaç yüz bin yıl sürdü. Böylelikle Batı Afrika'da, Enrico Fermi'nin Chicago'da inşa ettiği ilk yapay nükleer reaktörden iki milyar yıl önce doğal bir çekirdek reaktörü meydana geldi.

1972 yılına gelindiğinde Fransa'da, Gabun'dan gelen taş örneklerinin incelendiği tesiste çalışan bir teknisyen, örneklerin olağandışı bir kompozisyonu olduğunu fark etti. Numuneler normalde olması gerekenden daha fazla uranyum-235 içeriyordu. Oklo üzerindeki doğal nükleer reaktörün bulunmasıyla işin sırrı kısa sürede çözüldü. Taş örneklerinin daha yakından analiz edilmesi sonucu iki milyar yıl önce gerçekleşmiş fiziksel süreçleri incelemek mümkündü.

**HEISENBERG:** Yani iki milyar yıl önceki fiziksel süreçlerin bugünkünden farklı olup olmadığını araştırmanın mümkün olduğunu mu söylüyorsunuz?

**HALLER:** Evet. Bu sayede doğa sabitlerinin iki milyar yıl önceki değerlerine bakabiliriz. Elektromanyetik süreçlerin $\alpha$ sabitine bağlı olmasına benzer şekilde kimi fiziksel süreçler doğa sabitlerinin katılımıyla gerçekleşir. Bu sabitlerin bazıları zaman içinde değişiklik göstermiş olabilir; artık bunu tespit edebiliriz.

Burada özellikle samaryum elementi önem kazanıyor. Samaryum lantanit grubundadır ve nadir bulunan bir metaldir. Samaryum çekirdeğinin nötron bombardımanına tutulması sonucunda, atom bir nötron fazlası olan bir izotopa dönüşür. Çok yakın mesafede bir çekirdek rezonansı olduğundan samaryumda bu süreç çok çabuk işler. Rezonansın konumu, biraz da ince yapı sabitine bağlıdır. Sabit biraz değiştirilecek olursa rezonans farklı bir enerji düzeyine geçer ve nötron tepkimesi çok daha yavaş gerçekleşir.

Çekirdek fizikçileri bu olguyu daha yakından incelediklerinde, geniş nötron saçılma kesitini ölçerek $\alpha$ değerinin değişip değişmediğini belirleyebileceklerini buldular. Yapılan araştırmalar sonucunda ince yapı sabitinin son iki milyar yıl içerisinde en fazla $10^{-16}$ ölçeğinde değişmiş olabileceği sonucuna vardılar. Elbette bu çıkarım, başka sabitlerin değişmeden kaldıklarını varsayacak olursak geçerlidir.

**HEISENBERG:** Pek güzel. Bu durum $\alpha$'nın değişmediği anlamına gelmiyor mu peki?

**HALLER:** Belki de değişmiştir. Bu konuya birazdan daha ayrıntılı değinmek isterim. Dediğim gibi başka sabitler de değişmiş olabilir. Doğa sabitleri evrenin en tuhaf gizemleridir. Nereden gelmekteler? Gerçekten de mutlak bir sabitliğe sahipler mi? Evrenin her köşesinde aynılar mı? Aralarında bir bağlantı var mı? Tüm bu sorulara henüz yanıt vermemiz mümkün değil.

Herr Einstein doğa sabitlerinin verili etkileşimler nedeniyle sabitlendiğini, dolayısıyla burada herhangi bir özgürlük olmadığını ileri sürüyor. Bugün bunu da kanıtlayabilir durumda değiliz. Tahminimce sabitlerin seçiminde bir özgürlük olmalı; ama bu sorunun cevabı mutlaka yakında bulunacaktır. Bir sonraki soru, doğa sabitlerinin gerçekten sabit olup olmadıkları. Acaba zamana bağlı küçük de olsa değişiklikler oluyor mu? Tam da bu noktada birkaç yıl önce yapılan bir gözlemler dizisinden söz etmek istiyorum. Artık uzak galaksilerdeki, özellikle de kuasarlardaki atomların ince yapısını inceleyebilecek durumdayız.

**EINSTEIN:** Gerçekten takdire şayan. Elindeki verilerin kesin olmamasından kaynaklı olarak Sommerfeld'in zamanında ince yapı kuramıyla ilgili ne büyük güçlüklerle boğuştuğunu düşününce... Peki bu kuasarlarda hangi element ölçüldü?

**HALLER:** Tek bir tane değil, bir dizi elemente bakıldı. Avustralya, İngiltere ve ABD'den bir grup gökbilimci Hawaii'de kurulu Keck gözlemevinde ölçümler yaptı. Demir, nikel, magnezyum, kalay, gümüş gibi atomların ince yapısı incelendi. Uzak kuasarlardan gelen ışığı inceleyerek buradaki doğa sabitleri hakkında bilgi edinmek mümkün. Elbette bu ışığın dünyaya ulaşması için milyarlarca yıl geçmesi gerekiyor. Ama işin ilginç yanı, uzak kuasarların atom tayfı analizini yapan astrofizikçiler bundan dört yıl önce ince yapı sabitinde zamana bağlı bir değişiklik gözlemledi.

**NEWTON:** Uzak kuasarlarda gümüş bulunabileceğini hiç tahmin etmezdim. Peki ya altın?

**HALLER:** Dünyamızdaki tüm elementleri bu kuasarlarda da bulabiliriz. Bugüne kadar yaklaşık 150 farklı kuasar gözlemlendi; bunların bazıları tam on bir milyar ışık yılı uzaktaydı.

**FEYNMAN:** Ulu tanrım, kozmik tarihin başındaki karmaşık durumu gözlemlemişler neredeyse.

**HALLER:** Tam olarak öyle değil, Mr. Feynman, zira adı geçen tarih Büyük Patlama'dan tam üç milyar yıl sonrasına tekabül ediyor. Dediğim gibi, on bir milyar yıl önce ufak da olsa zamansal bir sapma gözlemlendi.

$$\Delta\alpha/\alpha = -(0{,}54 \pm 0{,}12)10^{-5}$$

İlginç olan, evrenin hangi yanına bakılırsa bakılsın, incelenen kuasarların tümünde yaklaşık olarak aynı sapmanın görülmesiydi. Yani ince yapı sabiti uzaya değil, zamana bağlı olarak değişmekte.

**HEISENBERG:** Eğer dediğiniz doğruysa, uzay ile zaman arasında küçük bir fark olduğu anlaşılıyor. Zaten böyle olması da mantıklı, zira Büyük Patlama zamanın tam başladığı noktada gerçekleşti. Bu bağlamda zaman ile uzay arasında da bir farkın olması kaçınılmaz.

**HALLER:** Evet, bahsettiğiniz anlamda zamanla uzay farklıdır. Gözlemlerden elde edilen sonucu doğru kabul edip ilk yaklaştırımda değişimin lineer olduğunu varsayarsam, $\alpha$'nın yılda yaklaşık olarak 1,2



Hawaii'deki Mauna Kea Dağı'nın zirvesindeki
W. M. Keck gözlemevinin teleskobu.

$\cdot 10^{-15}$ düzeyinde değiştiğini söyleyebilirim.

**FEYNMAN:** Bir dakika, Oklo'dan elde edilen verilerin izin verdiğinden daha büyük bir miktar bu.

**HALLER:** Hakkınız var. Ama $\alpha$'nın yanı sıra başka sabitlerin de değiştiğini varsayarsak, ortada sorun kalmıyor.

**EINSTEIN:** Eh, yaklaştırımın lineer olup olmadığı da henüz belli değil. Yine de çok büyük bir miktar sayılmaz. Başka yoldan ölçmek mümkün mü?

**HALLER:** Oldukça zor olsa da imkânsız değil. Lazerlerle çalışan fizikçiler daha bugünden harikulade kesinlikte ölçümler yapabiliyorlar. Hatırlatırsanız, lazere tekrar dönmek istiyorum.

**EINSTEIN:** Eğer $\alpha$ gerçekten de zamana bağlı olarak değişiyorsa, bunun bizim için anlamı üzerine düşünmek gerek. İnce yapı sabiti $\alpha$, malumunuz, $e^2 2\pi / hc$'ye eşit. Yani $h$ ve/veya $c$, hatta belki $e$ bile zamana bağlı olabilir.

**HALLER:** Çok ilginç bir şey ileri sürüyorsunuz, Herr Einstein. Işık hı-

zını temsil eden *c* gerçekten de zamana bağlı olabilir mi? Bunun görelilik kuramınız açısından anlamı nedir? Kuramınızdan vaz mı geçiyorsunuz?

**EINSTEIN:** Sohbetin heyecanı içinde bunu hiç düşünmemişim. Dediğiniz doğru, ışık hızı zamana bağlı olsa, kuram açısından bir felaket anlamına gelirdi.

**HALLER:** Evet, kuram açısından ölümcül sonuçları olurdu, Herr Einstein. Işık hızı gerçekten zamana bağlı olarak değişse görelilik kuramı nasıl işlerdi, hiçbir fikrim yok. Bern Üniversitesi'ndeki öğrencilerime hep şöyle derim: *c* eşittir 1. Eh, c zamana bağlı olsa, bu cümleyi kurmama olanak yok.

**NEWTON:** Birkaç gün önce gökbilim üzerine yazılmış bir makale geçti elime. Makalede *c*'nin zamana bağlı olabileceği öne sürülüyordu. Yani bu düşünceyi ciddiye alan bilimadamları var demek ki.

**HALLER:** Gökbilimcilerden görelilik kuramını anlamalarını bekleyemeyiz. Zamana bağlı bir *c* ile görelilik hesapları yapmaktan çekinmezler – düşüncesi bile korkunç! Zaten düşünsenize, ışık hızının zamanla değişmesi, görelilik kuramının temeli olan uzay-zaman birliği için felaket anlamına gelirdi.

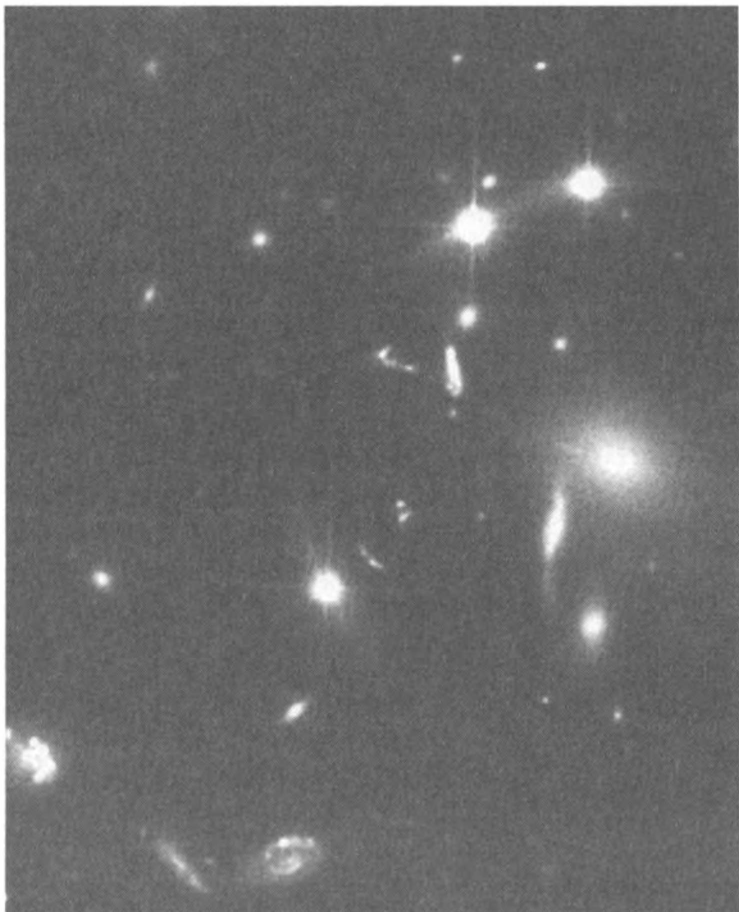
**EINSTEIN:** Gökbilimci dediğin, yıldızlara bakar, fizikten anlamadığı için göreliliği de bilmez. İşin aslı, gökbilimcilerin kuramsal makaleler yazmaları toptan yasaklanmalı. Az önceki konuya dönecek olursak, haklısınız, *c*'nin zamana bağlı olma ihtimalini bir kenara bırakmakta fayda var.

**NEWTON:** O zaman *h* zamana bağlı olarak değişiyor olsun. Yoksa burada da sorun mu var?

**FEYNMAN:** Açıkçası, o da benim açımdan bir sorun teşkil ediyor. Öyle olursa kuantum kuramını değiştirmek gerekir. O zaman da kuramı şimdikinden de az anlarım. Parçacık fiziğinde hesaplamayı kolaylaştırması bakımından genellikle *c* ile $h/2\pi$'yi 1 kabul ederiz. Bu durumda bu yuvarlamayı da yapamayacağız.

**EINSTEIN:** Haklısınız. Zamana göre değişen *h*, dostum Max Planck'ı da büyük olasılıkla rahatsız ederdi. Bu konuyu bir an önce kapatalım bence. O zaman geriye tek bir seçenek kalıyor, o da zamana göre değişme özelliğinin *e* için geçerli olması.

**HEISENBERG:** Yani elektrik yükü mü zamanla değişiyor? Sizce de tuhaf değil mi bu?



Hubble Uzay Teleskobu tarafından çekilmiş bir kuasar.
Uzak kuasarlardaki atom geçişlerinin incelenmesi sonucu
ince yapı sabitinin zamanla beraber değiştiği anlaşıldı.

**FEYNMAN:** Aslında o kadar tuhaf değil. Elektrik yükü, elektrikle yüklü bir nesneye uygulanan kuvvet etkilerini tarif eder; şimdiyse bu etkilerin zamana bağlı olduğunu kabul ediyoruz. Çok küçük bir sapma olduğundan fazla sıkıntı çekeceğimizi sanmam.

**EINSTEIN:** Benim açımdan da sorun yok; elbette eğer bu gözlem gerçekten de doğruysa. Az önce anmış olduğunuz, yılda $1{,}2 \cdot 10^{-15}$ değerine dönelim. Söyledikleriniz doğruysa bu sapma günümüzde de devam ediyor olmalı. Peki gerçekten de öyle mi? Öyle ya, zamansal değişim mesela üç milyar yıl önce sona ermiş olabilir. Kuasarlar üzerinde yaptığımız gözlemler bundan etkilenmez, Oklo'daki değerlerle de bir çelişki oluşmaz.

**HALLER:** Doğru, tüm sorunlar ortadan kalkar. Peki ama zamansal değişim neden üç milyar yıl önce dursun? Neden on milyar yıl önce değil? Belki gerçekten de dediğiniz gibidir. Bu durumda $\alpha$'nın zamansal değişimi lineer değildir. Ne $e$ ne de $e$'nin zamanla değişimi hakkında mantıklı bir kuramımız olmadığına göre, pekâlâ olabilir de. Kim bilir!

Günümüzde Standart Model'in, Büyük Birleşik Kuram adını taşıyan ve yüksek enerjilerde tüm etkileşimleri birleştiren bir sistemin parçası olduğu varsayılmakta, zira elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşimlerin sebep olduğu kuvvetler adı geçen yüksek enerjilerde birleştirilebilir. Bu durumda yüksek enerjiler için geçerli tek bir temel kuvvet olacaktır.

İnce yapı sabitinin zamana bağlı olarak değişmesi, ancak yüksek enerjilerde gerçekleşen tüm süreçleri açıklamayı başaran Birleşik Kuram'ın sabitinin zamana bağlı olmasıyla mümkündür. Dolayısıyla ince yapı sabiti zamanla değişiyorsa, aynı durum zayıf ve güçlü çekirdek etkileşimleri için de geçerli olmalıdır. Öte yandan güçlü etkileşimin kuvvetinin zamanla değişmesi, atom çekirdeklerinin kütlesinin ve bunların manyetik momentlerinin de zamana bağlı olarak değişmesi anlamına gelir. Tüm bu bileşenler bir araya geldiğinde güçlü etkileşimdeki değişikliğin nispeten büyük, ince yapı sabitinden yaklaşık 40 kat büyük olacağı tahmin edilmekte.

**NEWTON:** Yani bu durumda örneğin çekirdek kütleleri, ince yapı sabitinden 40 kat fazla değişecektir. Böyle bir değişimi gözlemlememiz mümkün olmaz mı?

**HALLER:** Evet, bu dediğinizi ben de düşündüm. Lazer fiziği hakkında kısa süre öncesine kadar pek bilgi sahibi olmadığımı, açıkçası pek de önemsemediğimi itiraf etmeliyim. Bern'deki kuantum optiği uzmanları ve Münih'teki meslektaşlarının lazer ölçümleri konusunda kırdıkları yeni rekorlar beni pek etkilemiyor. Bunlar atom fiziği ve kuantum elektrodinamiğiyle ilgili olan ve her ne kadar ölçümler giderek daha da hassaslaşsa da, bence modası çoktan geçmiş konular. Ne var ki güçlü etkileşimin zamana bağlı değişimi üzerine kafa yorduğumda, kuantum optikçilerinin bu alanda belki de bir şeyler keşfedebileceklerini fark ettim.

Konuyla ilgili olarak görüştüğüm Bern'deki meslektaşlar beni, 2005 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü alan Münih Üniversitesi'nde görevli lazer fizikçisi Theodor Hänsch'e yönlendirdi. Zaten Münih'te bir sunumum olduğundan, iki hafta sonra burada buluşmak üzere kendisiyle randevulaştık.

Theodor Hänsch bir süre önce bir sezyum saatini hidrojen geçişleriyle karşılaştırdığı ilginç bir deney yaptığını anlattı. Deneyin nesini ilginç bulduğunu sorduğumda şöyle dedi: "Biliyor musunuz, ne olacağını asla önceden kestiremiyorsunuz. Sezyumla çalışan bir atom saatinde hiper ince geçişler ölçülürken, hidrojen geçişlerinde bakılan basit atom geçişleridir. Neden burada ilginç bir şeyler olmasın ki?"

"Hiper ince geçiş" dediğinde ansızın dikkat kesildim.

**HEISENBERG:** Neden öyle hissettiğinizi anlıyorum. Hiper ince geçişlerde çekirdeğin manyetik momenti işin içine giriyor. Güçlü etkileşimde herhangi bir değişiklik olduğunda, manyetik moment de değişecektir.

**HALLER:** Kesinlikle öyle. Güçlü etkileşimin ölçeği değiştiğinde, manyetik moment ve bununla beraber hiper ince geçişin gücü de değişime uğrayacaktır. Ne var ki hidrojen geçişlerinde bir farklılık olmaz. Bu nedenle hidrojen geçişleriyle sezyum atom saati arasında bir fark oluşmasını beklerim. İkisini bir bugün bir de yarın karşılaştırsak arada küçük de olsa bir fark bulunmalı.

**NEWTON:** Ne büyüklükte bir farktan söz ediyoruz?

**HALLER:** En yakın durumlarda astrofizikçiler tarafından gözlemlenen fark, yılda $1{,}2 \cdot 10^{-15}$ sayısına tekabül eder. Bunu 40'la çarptığımızda yılda yaklaşık $5 \cdot 10^{-14}$'e ulaşırız. Hänsch'in sezyum saatiyle hidrojen geçişleri arasında gözlemlemeyi beklediği değişiklik buydu.

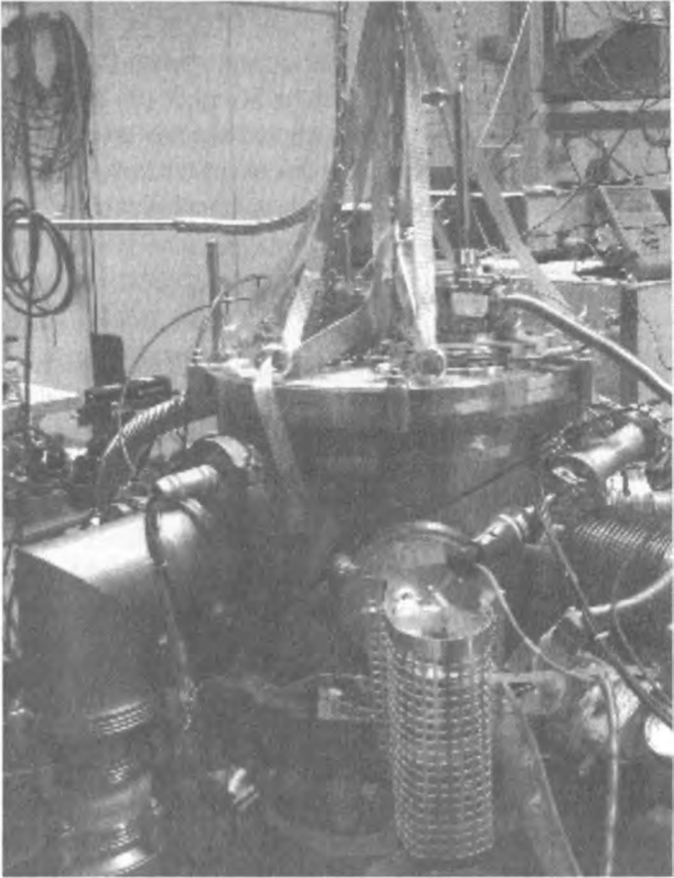
Münih yakınlarındaki Garching'de bulunan Max Planck Kuantum Optik Enstitüsü'nde (MPQ), güçlü etkileşimin zamanla değişime uğrayıp uğramadığını araştırmak amacıyla Hänsch idaresi altında deneyler yapıldı. Bunun için az önce anlattığım bilgiden hareketle bir sezyum saati, hidrojen geçişlerine dayanan bir saatle karşılaştırıldı. Sezyum atom saatlerinde zaman ölçümü için çekirdeğin manyetik momentine, dolayısıyla güçlü etkileşime dayanan hiper ince geçişler kullanılır. Öte yandan hidrojen geçişleri ince yapı sabitine dayanır.

Deney gerçekleştirildiğinde güçlü çekirdek etkileşiminin zaman içindeki sapmasının yılda $5 \cdot 10^{-14}$ değil, bunun onda biri kadar olduğu ortaya çıktı. En azından günümüzde ulaşılan sınır bu. Münih'te zamana bağımlılığı yılda $10^{-17}$ seviyelerine çekme planları var. Deneyler ağır elementlerin incelenmesine dayandığından, deney süreleri de uzun oluyor. Örneğin indiyum ya da gümüş gibi elementlerin çekirdeklerinin hiper ince geçiş esnasında nasıl davrandıkları gözlemleniyor. Bu esnada astrofizikçilerin yaptığı gözlemlerden bağımsız olmak gerekir. Elementler üzerinde yürütülen bu deneyler sonucunda, güçlü etkileşimin yılda $2 \cdot 10^{-16}$ seviyesinde bir değişikliğe uğradığı bulunabilir.

**EINSTEIN:** Bekleyelim ve görelim öyleyse. Belki de hiçbir şey bulunamayacak.

**HALLER:** Elbette; bir anlamda el yordamıyla yolumuzu bulmaya çalışıyoruz da denebilir buna. Ama gerçekten de bir şeyler bulunursa, keşfin büyük olacağından emin olabilirsiniz. Malum, büyük keşifler genellikle hiç beklenilmediğinde gerçekleşir.

Bir şey daha eklemek isterim. Hollanda'da bir grup biliminsanı, iki kuasardaki hidrojen geçişlerini inceledi. Kuasarların ikisi de yaklaşık on iki milyar ışık yılı uzaklıkta; dolayısıyla proton ve elektron kütleleri arasındaki ilişki hakkında bize bilgi verebilirler. Biliminsanları yaptıkları incelemeler sonucunda $^1/_{100\,000}$ ölçeğinde bir farklılık buldular. Bu veriyi lineer ekstrapolasyona tabi tutup proton kütlesi değişirken elektron kütlesinin aynı kaldığını varsaydığımda, proton kütlesinin yılda $3 \cdot 10^{-15}$ oranında değiştiği sonucuna ulaşırım. Çok büyük olmamakla beraber, kuantum optikçilerinin hassas deneylerle bulmasına yetecek bir değer. Bu sayı günümüzde sahip olduğumuz ölçüm kesinliğinin sınırı aynı zamanda.



Profesör Theodor Hänsch'in meslektaşlarıyla beraber Garching'deki MPQ'da gerçekleştirdiği deney.

**HEISENBERG:** Hazır bunlardan söz ediyorken, doğa sabitleriyle yaşam arasındaki bağlantıya da değinmek gerekir. Evrene baktığımızda infilak eden yıldızlar, yakınına gelen her şeyi yutan kara delikler görürüz. Gökcisimleri birbirleriyle çarpışır. İlk bakışta evren hiç de dost canlısı bir yere benzemiyor.

Ne var ki dikkatlice baktığımızda karşımıza bambaşka bir tablo çıkar. Kozmosumuz yaşam için biçilmiş kaftan gibidir. Temel par-

çacıkların nitelikleri, örneğin temel kuvvetlerin gücü şimdikinden biraz farklı olsa, ne bir yıldız olurdu, ne gezegenler ne de canlılar.

Örneğin atomu bir arada tutan kuvvetler birbirleriyle en uygun etkileşime sahiptir. Bu kuvvetler biraz daha zayıf ya da güçlü olsa, ya kimyasal tepkimeler işe yaramayacak ölçüde yavaş ya da atom çekirdekleri kararsız olurdu. İnce yapı sabiti $^1/_{137}$ değil de $^1/_{139}$ ya da $^1/_{134}$ olsaydı, yaşam için mutlak surette gerekli makromoleküller bambaşka olur ya da daha baştan hiç meydana gelemezdi. Uzay boyutları da yaşama izin verecek sayıda. Sadece iki boyut olsaydı, bir kez daha yaşam oluşamazdı. Yaşama uygun bu ince ayar nereden kaynaklanıyor? Tesadüfen mi oluştu?

**HALLER:** Bizi kozmolojinin en ateşli cephelerine taşıyan bir soru bu, Herr Heisenberg. Birçok evrenbilimci, içinde yaşadığımız evrenin önceleri tahmin ettiğimiz gibi emsalsiz olmadığına inanıyor. Her biri kendi doğa sabitleri ve kendi kuvvetlerine sahip çok, hatta belki de sonsuz sayıda evrenden sadece birisinde yaşıyor olabiliriz pekâlâ. Zaten artık evrenden değil çokluevrenden söz edilmekte. Yaşam, çok sıcak Merkür ya da fazlasıyla soğuk Plüton'da değil, hayata dost olan Dünya'da ortaya çıktı. Buna paralel olarak, yaşama uygun koşulların söz konusu bile olmadığı çok sayıdaki diğer evrenlerden birinde değil, bizim oluşmamıza izin veren bir evrende yaşıyoruz.

**EINSTEIN:** Başka evrenlerin var olabileceğini hayal bile edemiyorum. Bu dediğiniz fizik değil, olsa olsa metafizik ya da felsefe olabilir. Fizik deneye dayalı bir bilimdir. Başka evrenlerde deney yapmak da mümkün değil. Evrenimizin yaşamın oluşmasını arzu etmiş kozmik bir mühendis tarafından istemli olarak planlanmış ve tasarlanmış olması daha akla yakın değil mi?

**HALLER:** İhtiyar'ı kozmik mühendis rolüne yerleştirdiniz. Bu ihtimali de reddetmek istemem ama bu noktada ilahiyatın sınırına dayanmış bulunuyoruz ki, bu tartışmayı sürdürmeyi de arzu etmiyorum. Gerçekten de sayısız evren olduğunu varsayalım. Neden olmasın? Bu durumda doğa sabitlerinin, nasıl olup da yaşama uygun koşulları sağlayacak şekilde olduklarını kolayca açıklayabiliriz. Başka evrenlerde doğa sabitleri farklı ve bu yüzden de bunlarda yaşam gelişmemiş.

**FEYNMAN:** Peki ama buradan, doğa sabitlerini anlamaya ya da hesaplamaya çalışmanın hiçbir anlamı olmadığı sonucu çıkmaz mı? Ku-

ramsal olarak anlaşılması imkânsız, tesadüfi değerler.

Bir başka doğa sabiti olan elektron kütlesine bakalım. Evrenimizde birçok şeyin elektronun kütlesinin protonunkinden böylesine küçük olmasına bağlı olduğu görüşündeyim. 1836 elektronu bir araya getirdiğinizde ancak bir protonunkine eşit bir kütle elde edersiniz. Peki elektron daha ağır, örneğin bir muon ağırlığında olsa ne olurdu? Atomun büyüklüğü doğrudan elektron kütlesine bağlıdır. Elektron kütlesi 200 katına çıksa, atomların da 200 kat küçülmesi gerekir. Bu durumda biz insanlar birer santimetre büyüklüğünde olurduk.

**HEISENBERG:** Hayır, bu durumda bir santimetre de 200 kat daha küçük olurdu. Mesele biraz daha karmaşık. Örnek olarak bir hidrojen atomunu ele alalım. Hidrojenin kabuğunu meydana getiren tek bir ağır elektron, atomun protonu tarafından yakalanabilir. Elektron nötrinoya dönüşür: elektron + proton → elektron-nötrino + nötron. Şunu da eklemek gerekir: Ağır elektronların var olduğu evrendeki nötron kararlı olur ve bizim evrenimizdeki gibi bozunum sonucu bir elektron ve bir nötrinoya dönüşmez.

**NEWTON:** Elektron bu evrende de bir proton tarafından yakalanabilir ama, değil mi?

**HEISENBERG:** Hayır, böyle bir şey mümkün değil. Çekirdekteki protonla kabuktaki elektron, bir nötron üretecek enerjiye sahip değildir.

**HALLER:** Kozmik evrim çerçevesinde tarif ettiğimiz bu kurmaca evrende ağır elektronun akıbetinden bahsedeyim size. Evrenimiz sadece nötron ve nötrinolardan meydana gelir, çiçekler ve ağaçlarla süslü şu güzelim dünyamız daha baştan hiç meydana gelmezdi. Gökteyse ışıldayan yıldızlar değil, sadece nötrino yıldızları olurdu. Elektronu bu kadar hafif yaptığı için İhtiyar'a müteşekkir olmalıyız doğrusu.

**FEYNMAN:** Evrenimizde çok sayıda kütle parametresi vardır: elektronun yanı sıra muon, tauon ve bunlara ait nötrinolar. Kuarklar da birer kütleye sahiptir. Bu parçacıkların kütleleri bize tesadüfi görünüyor. Ama kim bilir, belki de bu bir sanrı, cehaletimizin bir yansımasıdır. Kütlelerin neden böyle olduklarını öğrenemediğimiz sürece madde hakkındaki bilgimiz de kısıtlı kalacaktır. Nötron neden protondan biraz daha ağır bilmiyoruz. Bunu kuark kütleleriyle açıklayabiliriz, zira d-kuark, u-kuarktan biraz daha ağır. Ne var ki bu sefer de bunun sebebini açıklayamıyoruz.

**HALLER:** Henüz anlamadığımız bir başka konu da, neden üç lepton ve kuark ailesi olduğu. Aslında evrenimizi oluşturmak için tek bir aile de yeterli olurdu.

İlk ailenin hiç var olmadığını varsayalım. Bu durumda madde, ikinci ailenin lepton ve kuarklarından, yani muonlarla "garip" kuarklardan müteşekkil parçacıklardan meydana gelirdi. Bu durumda en hafif parçacık, üç s-kuarktan oluşan, negatif yüklü omega-parçacığı olur, atom çekirdekleriyse bir, iki, üç vb. omega-parçacığından meydana gelirdi. Böyle bir evrende karmaşık atom çekirdeklerinin var olmayacağını kolayca tahmin edebiliriz, zira çekirdeği bir arada tutacak güçlü kuvvetin, bir s-kuarkla bunun karşı-kuarkından oluşan mezon alışverişiyle aktarılması gerekir. Ama bu mezonlar da yaklaşık 1 GeV'lik kütleye sahip olduklarından güçlü çekirdek kuvveti iki omega parçacığını bağlayabilecek durumda olmaz. Dolayısıyla pozitif muonların çevrelediği omega parçacıklarıyla dolu, son derece sıkıcı bir evrenimiz olurdu.

**EINSTEIN:** Beyler, sizce de var oldukları şaibeli kurmaca dünyalar hakkında fazlasıyla konuşmadık mı? Artık bir nokta koymak gerek. Bence yeniden gerçek dünyaya dönelim ve karaya çıkalım. Potsdam'a gidip Alte Post restoranında yemek yiyelim derim. Bugün buradaki son günümüz, yarın nasılsa Berlin'e döneceğiz.

**NEWTON:** Maalesef kuantum fiziği hakkındaki sohbetimiz de burada sona eriyor anladığım kadarıyla. Hepinize teşekkür etmek istiyorum. İlk başta daha kuantumun ne olduğunu bilmiyordum. Şimdi görüyorum ki kuantum mekaniği oldukça etkileyici bir kuram. Sizin aksinize, kendimi kuantum fiziğinin temsilcisi olarak görüyorum Herr Einstein. Siz bu kuramın dünyaya gelmesine önayak olsanız da, bu biçare çocuğu sahipsiz bıraktınız. Darılmazsanız size kötü bir baba diyeceğim. Neyse, benden de bu kadar, artık Potsdam'a dönebiliriz.

**EINSTEIN:** Kuantum fiziği biçare falan değil, Sir Isaac, bildiğiniz ucube. Fizik yüz yıl içinde onun yerine yeni bir şey koyacaktır, görürsünüz. Ola ki bir asır sonra yeniden buluşursak, bu haliyle kuantum fiziğinin yerinde yeller esecektir.

**FEYNMAN:** Yanılıyorsunuz, Einstein. Newton'ın hakkı var. Kuantum kuramıyla yeni bir şeyler keşfedildi, hakikate bir adım daha yakla-

şıldı. Doğanın hakikati olağanüstü bir şey. Bunu başaranlar da biz fizikçileriz. Bunu takdir etmenizi arzu ederdim açıkçası.

**HALLER:** Tartışmayı burada bırakalım artık. Bu akşam son kez beraber yemeğe çıkıyoruz. Son derece verimli sohbetler yaptık, umarım hepimiz yeni bir şeyler öğrenmişizdir. Herhalde bu sohbetlerden en çok faydalanan siz oldunuz, Sir Isaac – artık kendinize bir kuantum fizikçisi diyebilirsiniz.

**NEWTON:** Kesinlikle. Elbette birçok şeyi tam olarak kavrayamadığımı eklemem gerek. Kuantum fiziği takdire şayan bir kuram. Çok iyi iş çıkarmışsınız, Herr Heisenberg. Mr. Feynman, sizin QED'ye katkılarınız da yabana atılır cinsten değil. Yeniden normalleştirme fikriyle hedefi tam on ikiden tutturmuşsunuz, her ne kadar Paul Dirac bu uygulamadan pek hoşnut kalmamış olsa da.

**HEISENBERG:** Çalışmalarım hakkındaki övgü dolu sözleriniz beni gururlandırdı Sir Isaac. Kuantum mekaniğini, özellikle QED ve QCD' yle ilgili fikirlerle donatılmış olduğundan hâlâ son derece ilginç buluyorum. Sanırım Herr Einstein bu konuda farklı düşünüyor.

**FEYNMAN:** Yeniden normalleştirme konusundaki fikirlerimin bu konuda söylenmiş son söz olduğunu sanmıyorum. Zira kütleçekimini kuantum fiziğine yerleştirmeyi halen başaramadık. Yani daha yapacak çok işimiz var. Mr. Newton, bu konuda sizin katkılarınızı bekliyoruz, hatta sizin de, Herr Einstein.

**EINSTEIN:** Bu konuda bir şey yapabileceğimi sanmam. Ortaya attığım kütleçekim kuramı hâlâ doğru kuram ve kuantumlamaya da ihtiyacı yok. Bence asıl kuantum kuramında bir reforma ihtiyaç var. Ama sanırım bunu tartışmak için bu akşam yeterli olmayacaktır. Bu harikulade sohbetler için hepinize teşekkür ederim. Ama artık fiziği bir kenara bırakıp karnımızı doyurma zamanı.

Tekne Caputh'taki iskeleye yanaştı. Einstein yelkeni toplayıp kayıkhaneye götürdükten sonra hep beraber taksiyle Potsdam'daki Alte Post restoranına doğru yola çıktılar.

# Son

Ertesi sabah daha büyük bir taksiyle Berlin'e döndüler. Taksi onları önce Tegel Havalimanı'na götürdü. Burada Einstein ve Feynman'la vedalaştılar. Einstein Lufthansa ile Washington'a, Feynman'sa United Airlines'ın bir uçağıyla Los Angeles'a gitmek üzere biletlerini aldı. Haller, Heisenberg ve Newton tren garına devam etti. Haller Bern'e, Heisenberg Münih'e, Newton'sa Londra'ya giden trenlere bindi.

Magdeburg'un doğusunda trenin ansızın durmasıyla Haller uykusundan uyandı ve kompartımanda yalnız olduğunu görünce çok şaşırdı. Neden sonra Einstein, Feynman, Heisenberg ve Newton'la karşılaşmalarının ve sohbetlerinin sadece bir rüya olduğunu üzülerek fark etti. Kahve içip bir şeyler yemek için trenin yemekli vagonuna gitmek üzere ayaklandı.

Trenin kısa süre sonra yeniden hareket etmesiyle Haller rüyası hakkında düşündü. Heisenberg'le tanışıklığı vardı, Feynman'la bizzat çalışmıştı ama Einstein'la hiç karşılaşmamıştı, Newton'sa başka bir yüzyılda yaşamıştı. Bugün yaşasa Newton'ın kuantum mekaniği hakkında ne düşüneceğini gerçekten de merak ediyordu. Elbette günümüzde yaşayan bir Newton, klasik mekaniği ortaya atan Newton'dan farklı olacaktı. Büyük olasılıkla yine fizik alanında çalışacak ama belki de çok farklı bir alanı, örneğin kendisi gibi parçacık fiziğini seçecekti.

Yaklaşık bir saat sonra tren Berlin merkez tren garına girdi. Haller yeraltı treniyle Französische Straße durağına, oradan da yürüyerek Gendarm Oteli'ne gitti. Akşam yemeği için daha birkaç gün önce Einstein, Feynman, Heisenberg ve Newton'la yemek yediği Steak-

haus'u tercih etti. Elbette yaşadığını sandıklarının aslında bir rüya olduğunu biliyordu artık.

Ertesi sabah kahvaltının akabinde Jägerstraße'deki Bilimler Akademisi'ne gitti. Dört fizikçiyle buluşup ilk sohbetlerini yaptıkları odaya ürkek bir bakış attı. Oda boştu. Sonra saat 9'da Akademi oturumunun yapılacağı Leibniz Amfisi'nin yolunu tuttu.

—

# Bibliyografya

## Ders Kitapları

Feynman, R.P., *Kuantum Elektrodinamiği (KEDİ): Işık ve Maddenin Tuhaf Kuramı*, İstanbul: Pan, 1997.

Feynman, R. P., R. B. Leighton, M. Sands: *Lectures on Physics*, Volume III, Addison-Wesley Publishing Company, Reading/Mass. 1963; Türkçe seçkisi: *Altı Kolay Parça*, çev. Celal Kapkın, Tolga Birkandan, İstanbul: Evrim, 2002.

Fließbach, T., *Quantenmechanik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995.

Greiner, W., *Quantenmechanik*, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main, 1979.

Landau, L. D., E. M. Lifschitz, *Quantenmechanik*, Akademi Verlag, Berlin 1979.

Mitter, H., *Quantentheorie*, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1979.

Münster, G., *Quantentheorie*, Verlag de Gruyter, Berlin, 2006.

Schwabl, F., *Quantenmechanik*, Springer Verlag, Heidelberg, 2002.

Thirring, W., *Quantenmechanik von Atomen*, Springer Verlag, Heidelberg, 1979.

## Genel Literatür

Audretsch, J., *Die Sonderbare Welt der Quanten*, Beck Verlag, Münih 2008.

Baumann, K., R. Sexl: *Die Deutungen der Quantentheorie*, Viewer Verlag, Braunschweig, 1984.

Feynman, R. P., *Keşfetme Hazzı*, çev. Nur Küçük, Yasemin Çevik, İstanbul: Evrim, 2002.

Gribbin, J., *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*, çev. Nedim Çatlı, İstanbul: Metis, 2005.

Heisenberg, W., *Parça ve Bütün*, çev. Ayşe Atalay, İstanbul: Düzlem, 1992.

Hey, T., P. Walters, *The New Quantum Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, gözden geçirilmiş yeni baskı, 2003.

Lesch, H. ve Quot-Team: *Quantenmechanik für die Westentasche*, Piper Verlag, Münih, 2007.

Pietschmann, H., *Quantenmechanik Verstehen*, Springer Verlag, Berlin, 2003.

Zeilinger, A., *Einsteins Schleier, Die Neue Welt der Quantenphysik*, Beck Verlag, Münih, 2005.

# Dizin

**metis bilim**

EVELYN FOX KELLER
**Genin Yüzyılı**

JOHN GRIBBIN
**Schrödinger'in Kedisinin Peşinde**
KUANTUM FİZİĞİ VE GERÇEKLİK

ADAM ZEMAN
**Bilinç**
KULLANIM KILAVUZU

EVELYN FOX KELLER
**Toplumsal Cinsiyet ve Bilim** ÜZERİNE DÜŞÜNCELER

DOUWE DRAAISMA
**Bellek Metaforları**
ZİHİNLE İLGİLİ FİKİRLERİN TARİHİ

JOHN GRIBBIN
**Schrödinger'in Yavru Kedileri**
GERÇEKLİĞİN PEŞİNDE

FRANS DE WAAL
**İçimizdeki Maymun**
BİZ NEDEN BİZİZ?

DOUWE DRAAISMA
**Yaşlandıkça Hayat Neden Çabuk Geçer**
BELLEĞİMİZ GEÇMİŞİMİZİ NASIL ŞEKİLLENDİRİR?

GEORGE LEVINE
**Darwin Sizi Seviyor**
DOĞAL SEÇİLİM VE DÜNYANIN YENİDEN BÜYÜLENMESİ

J. P. CHANGEUX, P. RICOEUR

**Neden Nasıl Düşünürüz?**

ETİK, İNSAN DOĞASI
VE BEYİN ÜZERİNE BİR TARTIŞMA

W. H. CALVIN - G. A. OJEMANN

**Neil'in Beyniyle Konuşmalar**

DÜŞÜNCE VE DİLİN
SİNİRSEL DOĞASI

JOANNA MONCRIEFF

**İlaçla Tedavi Efsanesi**

PSİKİYATRİK İLAÇ KULLANIMINA
ELEŞTİREL BİR BAKIŞ

CHARLES SEIFE

**Alfa ve Omega**

EVRENİN BAŞLANGICI VE SONU

H. R. MATURANA, F. G. VARELA

**Bilgi Ağacı**

İNSAN ANLAYIŞININ
BİYOLOJİK TEMELLERİ

DAVID S. WILSON

**Herkes İçin Evrim**

DARWIN'İN TEORİSİ HAYATA BAKIŞ AÇIMIZI
NASIL DEĞİŞTİRİR?

D. GOLDBERG, J. BLOMQUIST

**Evren Kullanma Kılavuzu**

KARA DELİKLERİN, ZAMAN PARADOKSLARININ
VE KUANTUM BELİRSİZLİĞİNİN
TEHLİKELERİNİ ATLATMANIN YOLLARI

TOBIAS DANTZIG

**Sayı: Bilimin Dili**

HARALD FRITZSCH

**Yanılıyorsunuz Einstein!**

NEWTON, EINSTEIN, HEISENBERG VE FEYNMAN
KUANTUM FİZİĞİNİ TARTIŞIYOR

METİS BİLİM

Tobias Dantzig

# SAYI: BİLİMİN DİLİ

*Çeviren: Barış Cezar*

Sayı kavramı tarih boyunca nasıl bir gelişim izledi? Einstein'ın "sayının evrimi üzerine okuduğum en ilginç kitap" diye nitelediği bu klasikleşmiş eserinde matematikçi Tobias Dantzig, bu sorudan yola çıkarak sayıyı mercek altına yatırıyor.

"Mevcut okul müfredatları matematiği kültürel içeriğinden ayırıp sadece teknik detaylardan meydana gelen bir iskelet olarak bırakarak pek çok iyi beyni kaçırmıştır. Bu kitabın amacı bu kültürel içeriği tekrar kazandırmak ve sayının evrimini gerçekten olduğu gibi derin bir insani öykü olarak sunmaktır," diyen Dantzig, matematik tarihini emin adımlarla ilerleyen bir süreç olarak değil, rastlantıların ve sezginin büyük rol oynadığı bir süreç olarak canlandırıyor.

Üzerinde nadiren durduğumuz sıfır kavramının icadı, sayıların mistik anlamları ve onlara atfedilen gizem, sayı ibadeti, ilginç paradokslar, matematikçileri asırlardır düşündüren problemler ve daha birçok konu, Dantzig'in anlattığı ilginç öykünün birbirine bağlı halkalarını oluşturuyor. Bu kitabı okurken görüyoruz ki, yaşadığımız gerçekliğin dokusuna bu kadar derinlemesine işlemiş olan sayı kavramını daha yakından tanımak, bize kendi düşünce yapımız hakkında da önemli ipuçları veriyor.



METİS BİLİM

Dave Goldberg, Jeff Blomquist

# EVREN KULLANMA KILAVUZU

## Kara Deliklerin, Zaman Paradokslarının ve Kuantum Belirsizliğinin Tehlikelerini Atlatmanın Yolları

*Çeviren: Cemal Yardımcı*

Işık hızıyla hareket ederken aynaya baksam ne görürüm? Sadece bakarak gerçekliği değiştirebilir miyim? *Uzay Yolu*'ndaki gibi bir ışınlama makinesi yapabilir miyim? Büyük Hadron Çarpıştırıcısı dünyayı neden yok etmedi? Evren genişliyorsa neyin içinde genişliyor? Bir kara deliğe düşsem ne olur? Pratik bir zaman makinesi yapabilir miyim?

Bunlar *Evren Kullanma Kılavuzu*'ndaki sorulardan sadece birkaçı. Kitap bu ve benzeri soruları cevaplamanın yanı sıra, fizikteki en önemli meseleleri son derece anlaşılır ve esprili bir dille ele alıyor. Görelilik kuramı, kuantum mekaniği, olasılık ve rasgelelik, parçacıkların standart modeli, uzayın ve zamanın doğası, evrenin yapısı ve evrimi – tüm bunlar birbirinden komik karikatür ve dipnotlar eşliğinde anlatılıyor. Yazarların amacı, fiziğe genellikle yapıştırılan "sıkıcı" yaftasını tersine çevirip bu konuların aslında ne kadar ilginç ve eğlenceli olduğunu göstermek. Nitekim bu amaca başarıyla ulaşmış gibi görünüyorlar.

Unutmayın ki evren karmaşık bir mekanizmaya sahip muazzam bir düzenektir. Sağduyulu bir evren vatandaşı, onu kurcalamadan önce işleyişini, kurallarını, sınırlarını anlamak için kullanma kılavuzunu okumayı ihmal etmemelidir. Aksi takdirde başına geleceklerden –korkunç şeyler... Bahsetmek bile istemiyoruz– yayınevimiz sorumlu değildir.



METİS BİLİM

David Sloan Wilson

# HERKES İÇİN EVRİM

## Darwin'in Teorisi Hayata Bakış Açımızı Nasıl Değiştirir?

*Çeviren: Gürol Koca*

Darwin'in doğal seçilim teorisini ortaya atmasının üzerinden bir buçuk asır geçti. Bu süre içinde toplanan kanıtlar o kadar güçlü ki, evrimi artık sadece bir teori değil, bir olgu olarak görüyoruz. Fakat, diyor Amerikalı evrimci David Sloan Wilson, diğer disiplinlerle harmanlanmadığı ve günlük hayata uyarlanmadığı sürece evrim teorisinin hakkını vermiş sayılmayız. Zira evrim olup bitmiş bir şey değil, daima gözümüzün önünde, tüm hayatımıza sinmiş durumda. Canlıların tarihi upuzun bir evrim sürecinden ibaret olduğuna göre, hayatı ve kendimizi anlayabilmek için olaylara evrim temelli bir düşünce çerçevesinden bakmalıyız.

Bu düşünce tarzını benimsediğimizde, hamilelik bulantısından obeziteye, dans etmekten gülmeye, din ve ahlaktan siyasete her şey muazzam bir yapbozun, evrim yapbozunun parçaları haline geliyor. Dahası, insanın bu yapbozun sadece küçük bir parçası olduğunu, insana özgü sandığımız pek çok özelliğin aslında evrimin sürekliliği içerisinde çoğu canlıda - hatta tekhücrelilerde bile- görülebildiğini fark ediyoruz; bu da insanın doğadaki yerine ilişkin yanılgılarımızdan sıyrılmamızı sağlıyor.

Wilson'ın yaklaşımındaki diğer bir kritik nokta da, işbirliği ve dayanışmanın evrim sürecindeki önemini vurgulaması. Wilson'a göre evrim süreci, uyum gücü en fazla olan bireyden ziyade en iyi işbirliği yapan, en sağlam dayanışmayı kuran grubun lehinde işliyor. Demek ki barışçıl bir dünya o kadar uzak bir hayal değil.

*Herkes İçin Evrim*, isminin de ifade ettiği gibi herkesin ilgisini çekecek, herkesin rahatlıkla, keyifle okuyabileceği ve yararlanabileceği ufuk açıcı bir kitap.



METİS BİLİM

H. R. Maturana, F. G. Varela

# BİLGİ AĞACI

İnsan Anlayışının Biyolojik Temelleri

*Çeviren: Mahir Ünsal Eriş*

Şilili iki bilimadamı, Maturana ve Varela'nın 1984 yılında yazdığı *Bilgi Ağacı*, insanın bilişsel yetileri hakkındaki çığır açıcı kitaplardan biri oldu. Günümüzde sinirbilim, evrimci psikoloji, karmaşıklık ve bilinç alanındaki bilimsel gelişmelerin çoğu bu kitapta anlatılan "bilişsel inşacılık" kuramı tarafından öngörülmüş, dile getirilmişti. Geçen yıllar içinde Amerika'da üniversite, Şili'de lise seviyesinde ders programlarına dahil edilen *Bilgi Ağacı*'nın temel tezi şu: "Yapmak bilmektir, bilmek yapmaktır."

Yüzyıllardır filozofları dış dünyanın zihinde temsil edilmesine dayanan bir ikiciliğin ya da tekbenciliğin kafesine girmeye mecbur bırakmış olan bilme problemidir bu. Maturana ile Varela, insan zihnini ve bilme fenomenini esasen bir doğa olayı olarak anlamlandırabileceğimizi savunuyorlar. Geliştirdikleri etkileşime dayalı "kendi kendini var etme" (*autopoiesis*) kavramıyla, bilmenin "dışarıdaki" dünyanın temsili değil, bizzat yaşama süreci içerisinde bir dünya ortaya koymak demek olduğunu gösteriyorlar. Büyük Patlama'dan tekhücreli canlıların oluşumuna, oradan da dil ve dolayısıyla bilinç sahibi varlıklar olarak insana kadar uzanan ufuk açıcı bir yolculuğa çıkarıyorlar bizi.

Bu yeni bilgi anlayışının bireysel, toplumsal ve ahlaki içerimlerine de değinen yazarlar, yolculuğun sonunda şöyle diyor: "Yaptığımız her şey ortak yaşam koreografisi içinde yapısal bir danstır. İşte bu yüzden bu kitapta anlattıklarımız sadece bilimsel araştırma kaynağı değil, aynı zamanda insanlığımızı anlamak için bir kaynaktır."



metis bilim | 18

Tüm zamanların en önemli fizikçilerinden dördü bir araya gelip kuantum fiziği hakkında konuşsaydı ortaya nasıl bir sohbet çıkardı? Hiç şüphesiz ilginç bir sohbet. Aydınlatıcı. Kışkırtıcı. Hatta eğlenceli.

Alman fizikçi Harald Fritzsch'in Newton, Einstein, Heisenberg ve Feynman'ı bir araya getirdiği Yanılıyorsunuz Einstein! bu sıfatların hepsine sahip. Adrian Haller adlı (kurmaca) bir fizik profesörünün bir tren yolculuğu sırasında uyuyakalmasıyla rüyalar âleminde buluşan bu büyük fizikçilerin sohbeti, kuantum kuramının doğuşunu, gelişimini ve bugünkü durumunu yalın ve akıcı bir dille anlatıyor. Sohbet esnasında fizikçilerin birbirlerine takılmaları ve tatlı kaprisleri de cabası. Sözgelimi Einstein ısrarla "İhtiyar"ın evrenle zar atmayacağını, evrenin bir kumarhane olmadığını söyleyerek kuantum kuramına ilişkin hoşnutsuzluğunu dile getirirken, diğerleri onu kuantum kuramına kötü babalık etmekle, kuramın doğumuna katkıda bulunduktan sonra onu ortada bırakmakla suçluyor. Fizikçiler kendi aralarında konuşadursun, biz okurlar da bu sohbete kulak misafiri olarak modern fiziğin en zorlu konularını daha iyi kavrama imkânına kavuşuyoruz.




Metis Bilim
ISBN-13: 978-975-342-855-2




Metis Yayınları
www.metiskitap.com